



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEIJO TURPEINEN  
LASERSYTYTYSMATERIAALIEN KOKEELLINEN TUTKIMUS,  
SYTTYMISEN JA VÄLITTÄMISEN MALLINTAMINEN, SEKÄ  
LASERSYTYTTIMEN SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: Yliopistonlehtori  
Henrik Tolvanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 30. toukokuuta  
2018

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Teijo Turpeinen: Lasersytytysmateriaalien kokeellinen tutkimus, syttymisen ja välittymisen mallintaminen, sekä lasersytyttimen suunnittelu.

Diplomityö, 71 sivua, 7 liitesivua

Lokakuu 2018

Pääaine: Energia- ja biojalostustekniikka

Tarkastaja: yliopistonlehtori Henrik Tolvanen

Avainsanat: Lasersytytys, Magnesium, Alumiini, PTFE, Teflon, RDX

Tässä työssä tutkittiin alumiini/Teflon ja magnesium/Teflon seoksien lasersytytysominaisuuksia ja soveltuvuutta diodilasersytyttimen sytytysketjun primäärisytytysmateriaaliksi. Tutkimuksessa selvitettiin alumiini/Teflon tai magnesium/Teflon seoksille paras seosuhde, jolla seos saataisiin syttymään mahdollisimman pienellä laserpulssin teholla. Näistä valittiin tulosten perusteella parhaiten lasersytytykseen sopiva vaihtoehto. Lisäksi tutkittiin hiilimustan lisäyksen sekä eri tiheyksien vaikutusta seoksien syttymiseen. Tutkimuksessa selvitettiin lisäksi valitun parhaan seoksen deflagraation välittyminen RDX-räjähdyksineeseen ja reaktiorintaman siirtyminen detonaatioksi.

Paras seosuhde löytyi kun seos muodostettiin 73 massaprocentista magnesiumia ja 27 massaprocentista Teflonia, johon lisättiin 0.5 massaprocenttia hiilimustaa (aktiivihiihtä) lisäämään laserpulssin absorptiota. Paras tiheys taas on seoksen normaalitiheys jauheena ( $0.602 \text{ g/cm}^3$ ), pelletiksi puristaminen heikentää syttymistä. Välittyminen RDX-räjähteeseen varmistettiin kokeellisesti. Parhaalla seossuhteella saatiin RDX-räjähdyksine syttymään, kun laserpulssin energia on 32.05 millijoulea ja teho 0.32 wattia, joka vaatii noin 30 watin hetkellisen huippusähkötehon tehollähteeltä ja 3 joulea pulssienergiaa laitteelta. Täten on löydetty lasersytytykseen sopiva massa, jolla saadaan RDX-pelletti syttymään normaalissa ilmakehän paineessa pienellä laserin teholla.

Tutkimusten perusteella rakennettiin malli Excel-ohjelmaa käyttäen deflagraation välittymisestä sytytysmassasta RDX:ään. Mallilla voi arvioida adiabaattista liekin lämpötilaa ja reaktio-energian vapautumista, sekä arvioida laserlaitteen tarvittavia tehoja ja energiaa. Mallilla voi arvioida sytytysmateriaalin minimimassaa, jolla välittyminen RDX-pellettiin onnistuu. Deflagraation siirtyminen RDX:ssä detonaatioksi todettiin kokeellisesti.

Työssä suunniteltiin myös sopiva sytyttimen kuorirakenne lasersytytykseen, jossa käytetään parhaalla seossuhteella tehtyä magnesium/Teflon/hiilimusta-seosta. Kuorirakenne myös testattiin käytännön testeissä ja todettiin tehtävään sopivaksi. Kuorirakenteelle suunniteltiin kuituliitانتä ja suoritettiin lujuuslaskelmat Autodesk Inventoria käyttäen.

Työn kokonaistavoite saavutettiin ja on siis kehitetty turvallinen, normaalissa ilmakehän paineessa toimiva, epäherkällä ja lyijyttömällä aloitussytytysmassalla toimiva lasersytytin.

## ABSTRACT

Tampere University of Technology

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Teijo Turpeinen: Experimental research on laser ignition materials, model for ignition and detonation, and development of laser igniter

Master of Science Thesis, 71 pages, 7 Appendix pages

October 2018

Major: Energy and Biorefining Engineering

Examiner: University lecturer Henrik Tolvanen

Keywords: Laser ignition, Magnesium, Aluminium, PTFE, Teflon, RDX

In this Master's thesis laser ignition attributes and applicability of aluminium/Teflon and magnesium/Teflon mixtures for primary ignition material as part of ignition chain for diode laser igniter were studied. The best mixture ratio for aluminium/Teflon and magnesium/Teflon were determined, in which the ignition would happen with smallest laser pulse power. The most suitable mixture for laser ignition system was selected based on the results. In addition the effect of adding carbon black to the mixtures and the effect of different densities of the mixtures to the laser ignitability were studied. Also the deflagration to detonation transition (DDT) from the best mixture to RDX explosive was determined.

The best mixture ratio was found to be 73 mass percentage of magnesium and 27 mass percentage of Teflon added with 0.5 mass percentage of carbon black to enhance the absorption of laser pulse. The best density for the mixture was discovered to be in powder form ( $0.602 \text{ g/cm}^3$ ), ignition was negatively affected by pressing the mixture to pellet form. Deflagration to detonation transition was confirmed in transition experiments when the best mixture was ignited with laser pulse, which then ignited the RDX explosive. The laser pulse energy in the DDT experiment was 32.05 millijoules and power of 0.32 watts, which requires peak power of 30 watts and 3 joules of pulse energy from the laser device. Thus the best mixture has been discovered to ignite RDX pellet with small laser power in standard atmospheric pressure. The transition in RDX explosive from deflagration to detonation was observed experimentally.

Based on the results of the study, a computer model of deflagration transition from pyrotechnical mixture to high explosive was created using an Excel-software. The computer model can be used to estimate the adiabatic flame temperature and the enthalpy of reaction. The model also estimates the power and energy required from the laser device to ignite the Mg/Teflon mixtures. Model can be used to estimate the minimum amount of ignition material, that can achieve deflagration to detonation transition into the RDX-pellet.

Suitable laser igniter casing for the best mixture of Mg/Teflon/Carbon black was designed at this work. Tests were performed for the casing and it was discovered to fulfill its purpose. Optical fiber connection was designed for the casing and strengths of material were calculated using Autodesk Inventor.

The main objective of the work was achieved and thus a safe, insensitive laser igniter, that works in normal atmospheric pressure and has been built with lead-free starter ignition mass, has been developed.

## ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena on lisätä räjähdystekniikan turvallisuutta ja tuottaa tärkeää tutkimustietoa Puolustusvoimien käyttöön. Diplomityön aihe on erittäin laaja, mikä aiheutti haasteita, mutta samalla lisäsi mielenkiintoa työtä kohtaan. Rajauksien tekeminen oli toisinaan vaikeaa.

Haluan kiittää kaikkia Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen ja muiden sidosryhmien sekä yritysten henkilöstöä, jotka jaksoivat antaa korvaamatonta apua työn edistämiseksi. Haluan antaa erityiskiitokset Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen Energeettisten teknologioiden tutkimusalueelle ja työn ohjaajalle Matti Harkomalle mahdollisuudesta tehdä diplomityö erittäin mielenkiintoisesta ja monipuolisesta aiheesta. Kiitän myös työn tarkastajaa Henrik Tolvasta korvaamattomista neuvoista ja tuesta työn aikana.

Ylöjärvellä, 12.10.2018

Teijo Turpeinen

## SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT .....	6
1. JOHDANTO .....	8
1.1 Diplomityön tausta ja lähtökohdat .....	8
1.2 Työn tavoitteet, kulku ja tutkimuskysymykset .....	9
2. TEOREETTINEN TAUSTA .....	10
2.1 Räjähdysaineet .....	10
2.2 Räjähdysaineiden sytytysmenetelmiä .....	10
2.2.1 Iskusytytys .....	10
2.2.2 Liekkisytytys .....	11
2.2.3 Sähkösytytys .....	12
2.2.4 Lasersytytys .....	15
2.3 Energeettisten aineiden palaminen, detonaatio ja välittyminen .....	16
2.3.1 Palaminen .....	16
2.3.2 Deflagraatio .....	16
2.3.3 Detonaatio .....	17
2.3.4 Välittyminen .....	19
2.3.5 Deflagraation välittyminen detonaatioon .....	19
2.4 Syttymis- ja välittymismallin käsitteet .....	20
2.4.1 Entalpia ja Ominaisentalpia .....	20
2.4.2 Reaktioentalpia .....	21
2.4.3 Adiabaattinen palamislämpötila .....	21
2.5 Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien esittely .....	22
2.5.1 Magnesium/Teflon ja alumiini/Teflon .....	22
2.5.2 Royal Demolition Explosive .....	23
2.5.3 Hiilimusta .....	23
2.5.4 Polylaktidi .....	23
2.6 Sytyttimen kuorirakenteessa käytetyn lujuusopin teoriaa .....	24
2.6.1 Puristusjännitys .....	24
2.6.2 Taivutusjännitys .....	25
2.6.3 Von Misesin lujuushypoteesi .....	25
3. KOEJÄRJESTELYT, TIETOKONEMALLINNUS, SEKÄ SYTYTTIMEN KUORIRAKENTEEN SUUNNITTELU JA TESTAUS .....	27
3.1 Alumiini/Teflon ja magnesium/Teflon lasersytytys-materiaalien tutkimuksen koejärjestelyt .....	28
3.2 Syttymisviiveen mittaustilanne .....	31
3.3 Syttymisen ja välittymisen mallintaminen .....	31
3.3.1 Yleistä .....	31
3.3.2 Malli .....	32
3.4 Sytytinkuori-prototyypin suunnittelu .....	38

3.5	Prototyypin testaus .....	42
3.6	Prototyypin kuituliitäntä.....	43
4.	TULOKSET .....	45
4.1	Syttymiskokeiden tulokset .....	45
4.2	Syttymis- ja välittymismalli .....	54
4.3	Prototyypin käytännön testien tulokset .....	56
4.4	Lasersytytin ETEKN2 .....	57
4.5	ETEKN2-mallin lujuuslaskennan tulokset.....	61
4.6	Pohdinta ja jatkotoimenpiteet.....	63
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	65
	LÄHTEET.....	68
	LIITE 1 UP-AND-DOWN MENETELMÄ.....	72
	LIITE 2: SYTTYMISVIRRRAN SUHDE LASERIN TEHOON.....	74

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

Al	Alumiini
DDT	Deflagration to detonation transition
Mg	Magnesium
PBX	Plastic-bonded explosive
PTFE	Polytetrafluorietyleni, Teflon
RDX	Royal Demolition Explosive, Hexogen
TNT	2,4,6 trinitrotolueteeni

$A$	Pinta-ala	$[m^2]$
$A_{Kuitu}$	Kuidun pinta-ala	$[m^2]$
$E$	Lämpöenergia	$[J]$
$E_{Pulssi}$	Laserpulssin energia	$[J]$
$F$	Voima	$[N]$
$H_i$	Ominaisentalpia	$[J/mol], [J/g]$
$h_{total}$	Reaktiossa vapautunut energia	$[J]$
$\Delta H_{total}$	Yhteisentalpia	$[J]$
$I$	Virta	$[A]$
$I_x$	x-akselin neliömomentti	$[m^4]$
$l_{Pulssi}$	Laserpulssin pituus sekunteina	$[s]$
$M$	Moolimassa	$[g/mol]$
$m$	Massa	$[g]$
$M_z$	Taivutusmomentti neutraaliakselin suhteen	$[Nm]$
$mol_{osuus}$	Mooliosuus	$[-]$
$m_{total}$	Seoksen massa	$[g]$
$n$	Moolimäärä	$[mol]$
$N$	Näytemäärä	$[-]$
$n_{total}$	Kokonaismoolimäärä	$[mol]$
$P$	Teho	$[W]$
$P_{05}$	5% syttymistodennäköisyys	$[-]$
$P_{95}$	95% syttymistodennäköisyys	$[-]$
$U$	Jännite	$[V]$
$s$	Keskihajonta	

$U_{Laser}$	Laserpulssin energiatiheys.	[J/m <sup>2</sup> ]
$U_{RDX}$	RDX:n syttymisenergiatiheys	[J/m <sup>2</sup> ]
$U_{total}$	Kokonaisenergiatiheys	[J/m <sup>2</sup> ]
$\bar{X}$	Keskiarvo	[-]
$y$	Kohtisuora etäisyys neutraaliakselista	[m]
$\sigma$	Puristusjännitys	[Pa]
$\sigma_x$	Taivutusjännitys	[Pa]
$\sigma_{vert}$	Vertailujännitys	[Pa]
$\sigma_{xyz}$	x, y, tai z-akselin suuntainen jännitys ja	[Pa]
$\tau_{xyz}$	xy-, yz- tai xz-pinnan suuntainen leikkausjännitys	[Pa]
$\%_{osuus}$	Aineen massaprosentti seoksessa	[%]



# 1. JOHDANTO

Räjähteet ja pyrotekniset massat sytytetään käyttäen sytyttimiä tai muita toimilaitteita, joita käytetään armeijan laitteissa ja sovelluksissa sekä teollisuus- ja siviilikäytössä. Tyypillisin energettisten massojen sytytystapa on sähkösytytys, jossa sytytysjohtoa pitkin kulkeva sähkövirta sytyttää hehkulangan ympärille puristetun massan. Ongelmana näissä sähkösytytys-menetelmissä on että energettinen massa ei ole täysin eristetty sähkölähteistä. Siksi sytytinlaitteiston osat ovat alttiina tahattomalle syttymiselle, johtuen esimerkiksi radiolähettimien tai korkeajännitelinjojen sähkömagneettisesta säteilystä. Tahattoman syttymisen voi aiheuttaa myös salama tai ihmiseen varautunut staattinen sähkö. Sähkösytyttimiin on olemassa lisälaitteistoja, jotka pienentävät tahattoman syttymisen vaaraa, mutta ne ovat kalliita eivätkä takaa 100-prosenttista suojaa.[1]

Siksi on haluttu kehittää lasersytytin, joka voisi olla turvallisempi vaihtoehto perinteisille räjähdysaineiden sytytysmenetelmille. Lasersytyttimessä käytetyt materiaalit pienentävät sähkövarauksesta tai sähköisestä häiriöstä johtuvan tahattoman syttymisen vaaraa.

## 1.1 Diplomityön tausta ja lähtökohdat

Diplomityön tilaajana on Ylöjärvellä toimivan Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen Räjähdde- ja suojelutekniikan osaston Energeettiset teknologiat tutkimusala.

Puolustusvoimien tutkimuslaitos on monitieteinen organisaatio, joka tuottaa vaativia puolustusalan tutkimus- kehittämis- ja testauspalveluja strategian ja sotataidon sekä käyttäytymistieteiden ja useiden teknologioiden alueille. Tutkimuslaitoksen Räjähdde- ja suojelutekniikan osastoon kuuluva Energeettisten teknologioiden tutkimusala on keskittynyt tutkimaan pääasiassa räjähteitä, räjähdysaineita, pyroteknisiä aineita ja ruuteja sekä niitä hyödyntäviä välineitä ja sovelluksia.

Puolustusvoimien tutkimuslaitoksessa on tutkittu sotilasräjähdysaineiden (high explosives), muun muassa RDX:n, lasersytytystä aiempiin tutkimushankkeisiin liittyen. Saatujen tulosten [2] ja kirjallisuuslähteiden perusteella normaalissa ilmakehän paineessa RDX:n syttymiseen tarvittava energia on liian korkea mahdollistaakseen järkevän ja taloudellisen käytännön sytytinsovellukseen. Tarvitaan sytytysketju, jossa syttyminen välittyy lasersytytykseen soveltuvasta aloiteaineesta sytyttimessä käytettävään räjähdysaineeseen, eli tässä työssä käytettyyn RDX-räjähdysaineeseen.

Puolustusvoimissa halutaan vähentää ihmiselle vaarallisen lyijyn käyttöä energettisissä materiaaleissa, joten sytytysmassan materiaalivaihtoehdoiksi valittiin alumiini, magnesium ja Teflon. Materiaalivaihtoehdot ovat myös keskenään epäherkkiä, eli eivät reagoi tahattomasti.

## 1.2 Työn tavoitteet, kulku ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen kohteena on löytää alhaisimmalla syttymisenergialla toimiva Al/Teflon (PTFE= Teflon) tai Mg/Teflon materiaalien seos, joka sytytetään käyttäen laserpulssia normaalissa ilmakehän paineessa, syttymisenergiaa pyritään myös pienentämään lisäämällä hiilimustaa seoksiin. Tulosten perusteella on tarkoitus valmistaa tietokonemalli deflagraation välittymisestä sytytysmassasta RDX:ään. Reaktorintaman siirtyminen RDX:ssä deflagraatiosta detonaatioon on tarkoitus todeta kokeellisesti. Lopuksi suunnitellaan 3D-tulostettava sytytinrakenne lasersytyttimelle jossa käytetään tutkimuksessa löydettyä alhaisimmalla syttymisenergialla toimivaa seosta ja RDX-pellettejä. Sytytinrakenteeseen tehdään kuituliitانتä ja lujuuslaskennat.

Tämän työn kokonaistavoitteena on siis valmistaa turvallinen, normaalissa ilmakehän paineessa toimiva, epäherkällä ja lyijyttömällä aloitusytytysmassalla toimiva lasersytytin.

Työn tutkimuskysymyksiä ovat:

- Miten alumiini/Teflon tai magnesium/Teflon seoksien seossuhde vaikuttaa seoksen syttymiseen?
- Miten hiilimustan lisääminen vaikuttaa sytytysmassan laserpulssin absorptioon?
- Miten syttymismassan tiheys vaikuttaa syttymiseen?
- Välittyykö RDX-pelletissä sytytysmassan deflagraatio RDX:ään ja siirtykö deflagraatio detonaatioksi?
- Millainen on oltava parhaalla sytytysmassalla ja RDX-pelleteillä ladattu lasersytyttimen kuorirakenne?

Työ aloitetaan kirjallisuustutkimuksella, jonka jälkeen suoritetaan kokeellisesti pienimmällä laserin teholla syttyvän sytytysmassan etsiminen, jossa käytetään Up-And-Down menetelmää ja tilastollisia menetelmiä. Seuraavassa vaiheessa testien perusteella saatuja tietoja käytetään Excel-tietokoneohjelmalla tehtävän syttymis- ja välittymismallin rakentamiseen. Välittymismallista saadaan selville seoksen minimimassa, jolla RDX-räjähdysaine syttyy. Kolmannessa vaiheessa tätä minimimassan tietoa käytetään hyväksi sytyttimen kuorirakenteen suunnittelussa. Lopuksi sytyttimelle tehdään käytännön testaukset, jotta sytyttimen toiminta ja käyttöön soveltuvuus voidaan määritellä.

## 2. TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä osiossa esitellään yleisesti tutkimuksessa käytetyt materiaalit ja yleinen kuvaus sytyttimen kuorirakenteen lujuuslaskennassa käytetyille käsitteille. Lisäksi esitellään erilaisten entalpioiden käsitteet ja adiabaattisen lämpötilan etsintä, joita käytetään syttymis- ja välittymismallin pohjana. Myös räjähdysaineista on esitetty yleinen kuvaus, sekä useita eri räjähdysaineiden sytytysmenetelmiä on kuvattu.

### 2.1 Räjähdysaineet

Räjähdysaineina voidaan pitää materiaalia tai materiaalien seosta, joka detonoi reagoidessaan. Tällöin reaktiorintama etenee shokkiaaltona ylääännopeudella. Räjähdysaineessa on aina mukana hapetin ja polttoaine. Hapetin ja polttoaine voivat olla joko samassa molekyylissä (yksikomponenttisysteemi) esimerkiksi TNT (2,4,6 trinitrotolueteeni), RDX ja Oktogeeni tai eri molekyyleissä (monikomponenttisysteemi) esimerkkinä muovisidosteiset sotilasräjähdysaineet (PBX) ja kallionlouhintaan käytetyt emulsioräjähdysaineet. Yleensä räjäytysaineet koostuvat hiilestä, vedystä, hapesta ja typestä. Tällaisia räjähdysaineita ovat muun muassa edellämainitut TNT, RDX ja Oktogeeni. Perinteiset herkäät aloiteräjähdysaineet sisältävät molekyylirakenteeseensa esimerkiksi lyijyä, elohopeaa, hopeaa tai kuparia. Tällaisia epäorgaanisia räjähdysaineita ovat esimerkiksi elohopeafulminaatti ja lyijytrisinaatti sekä lyijy-, hopea- ja kupariatsidi.[3]

### 2.2 Räjähdysaineiden sytytysmenetelmiä

Räjähdysaineiden kemiallisen reaktion turvalliseen käynnistämiseen on käytettävä sytyttimiä. Tässä osiossa esitetään yleisesti muutamia räjähdysaineiden sytytysmenetelmiä.

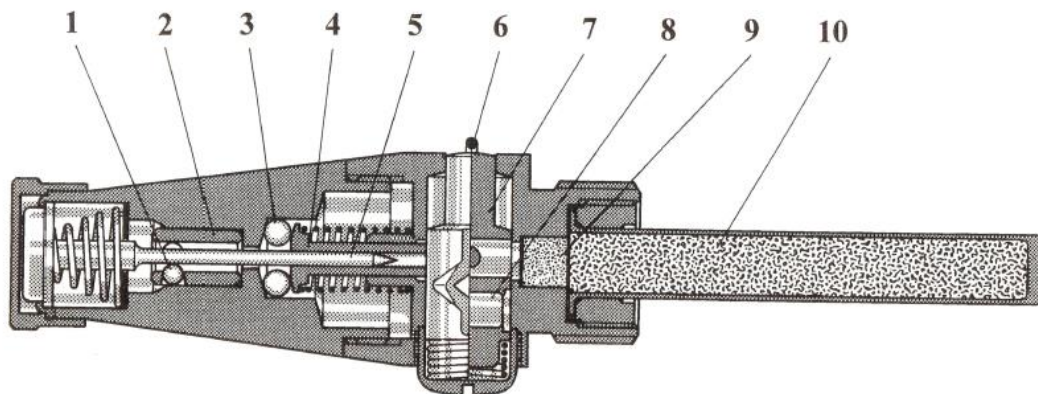
#### 2.2.1 Iskusytytys

Iskusytytin on mekaaninen sytytin jonka toiminta perustuu käytetyn aloiteaineen iskuherkkyyteen. Iskusytytyksessä aloiteaineeseen kohdistetaan riittävän terävä isku tai voima, joka saa sen detonoimaan. Iskusytytyksessä aloiteaineen detonaatio välittyy yleensä väliräjäyttimen kautta varsinaiseen räjäyttimeen. Iskusytytystä käytetään yleisesti myös nallin avulla tapahtuvaan aseruudin sytyttämiseen. Iskusytytys on todettu luotettavaksi ja mekaanisen koneiston aiheuttama viive on pieni. Huonona puolena

iskusytytyksessä on mekaanisen koneiston viiveen ja energettisen aineen syttymisviiven summa, joka voi rajoittaa konetuliaseiden ampuamanopeutta.[4]

Iskusytytys kehitettiin alunperin tuliaseita varten 1700-luvulla. Nykyäänkin iskusytytystä käytetään käsiaseiden patruunoissa. Myös tykistön ammuksissa käytetään iskusytytystä.[4]

Esimerkki iskusytyttimestä on Kuvassa 1 jossa on esitettyä sirpalekranaatin sytyttimen läpileikkaus. Kranaatin pään (vasen pää kuvassa 1) törmätessä kohteeseensa iskuri iskee iskunalliin, jonka räjähdys välittyy väliräjäyttimen ja räjäyttimen kautta kranaatissa olevaan räjähdysaineeseen.[5]



*Kuva 1. Sirpalekranaatin sytyttimen läpileikkaus. 1 varmistinpalan kuula, 2 varmistin, 3 varmistinkuula, 4 varmistinholkki, 5 iskuri, 6 kuljetusvarmistin, 7 nallipesä, 8 räjähdysnalli, 9 väliräjäytin, 10 räjäytin. [5]*

## 2.2.2 Liekkisytytys

Liekkisytytyksessä räjähdde sytytetään suoraan avoimella liekillä joka koskettaa aloiteainetta ja aktivoi siinä riittävästi eksotermisiä reaktioita eli palamista. Palaminen voi jatkua palamisena, deflagraationa tai detonaationa.[4]

Liekkisytytyksen tunnetuin esimerkki ovat tulilangat jotka ovat vanhimpia nykyään käytössä olevia sytytyslaitteita. Tulilangassa oleva pyrotekninen massa voidaan sytyttää palamaan avoliekillä jonka jälkeen palorintama etenee tulilankaa pitkin räjähteeseen, Kuva 2.[4]

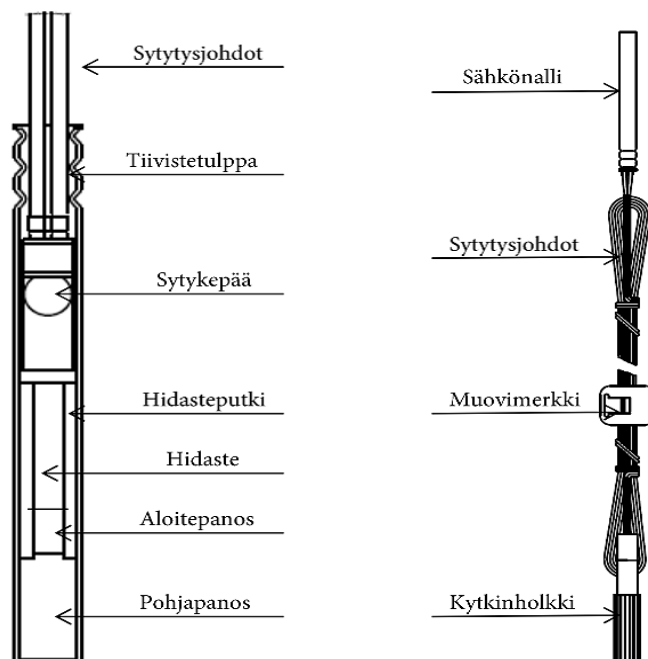


**Kuva 2. Tulilanka palaa. [6]**

Tulilangalla räjähdettä ei saada sytytettyä kovin tarkasti tietyllä ajanhetkellä vaan syttymiseen kuluu viive, joka riippuu tulilangan pituudesta sekä tulilangan ominaisuuksista. Etuina tulilankasytytyksessä ovat sen yksinkertaisuus ja luotettavuus.[4]

### 2.2.3 Sähkösytytys

Sähkösytytystapoja on monia ja ne voidaan jakaa seuraaviin luokkiin, kipinäsytytys, hehkusytytys, ohutkalvosytytys, massapurkaussytytys ja räjähdyslankasytytys. [5]. Yleiskuva sähkösytyttimestä Kuvassa 3.

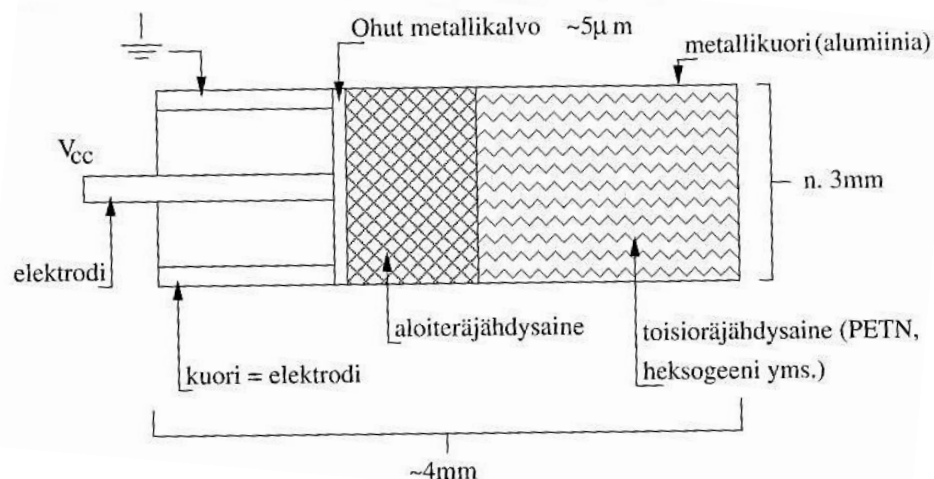


**Kuva 3. Forcitiin AUSTIN ROCKSTAR II sähkösytytin. [7]**

Kipinäsytytys on vanhin sähköisistä sytytysmenetelmistä ja se perustuu kipinävälin käyttöön, kuten bensiinimoottoreissa. Menetelmän haittana ovat tarvittava korkea jännite, herkkyys ja epäluotettavuus. Etuna menetelmässä ovat sytytyksen pieni viive ja yksinkertaisuus. Kipinäsytytystä ei enää käytetä räjähteissä vaan sen korvasi hehkusytytys.[5]

Hehkusytytyksessä käytetään kuumennettavaa hehkulankaa tai muuta kuumennettavaa kappaletta sytyttämään energoittinen materiaali. Lanka on joko kosketuksissa tai upotettuna energoittiseen materiaaliin, joka sähkövirran avulla kuumennetaan materiaalin syttymispisteeseen. Hehkusytytys on luotettavampi kuin kipinäsytytys, mutta ei yhtä tarkka tai nopea.[5]

Ohutkalvosytytys toimii samalla periaatteella kuin hehkusytytys mutta hehkulanka on korvattu aloiteräjähteellä päällystetyllä kalvolla. Ohutkalvosytytin voi olla myös päällystämätön, mutta silloin vaaditaan suurempi sähköenergian määrä syttymiseen. Kalvosytyttimen etuna on pieni syttymisviive ja haittana herkkyys ja kalliimpi rakenne kuin hehkulangalla. Ohutkalvosytyttimen läpileikkaus on esitetty kuvassa 4. [5]

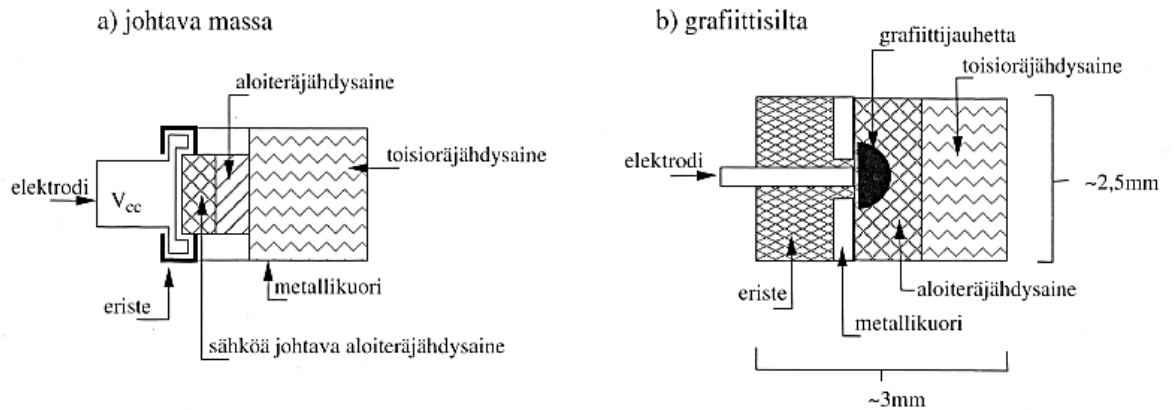


**Kuva 4. Ohutkalvosytytin.[5]**

Massapurkaussytytin on kehitetty 1900-luvulla risteytyksenä hehku- ja kipinäsytytyksistä. Massapurkaussytyttimiä on kahdenlaisia, johtavaan massa perustuvia sytyttimiä, joissa on sähköä johtava räjähdemassa, ja grafiittijauheeseen perustuvia sytyttimiä, joissa grafiitti toimii lämpövastuksena räjähteen ollessa puristettuna sen päälle. Kun massapurkaussytyttimeen johdetaan sähkövirta, räjähdemassan hiukkasten väliin syntyy kipinäintiä ja pintapurkauksia aiheuttaen räjähteen syttymisen, Kuva 5.[5]

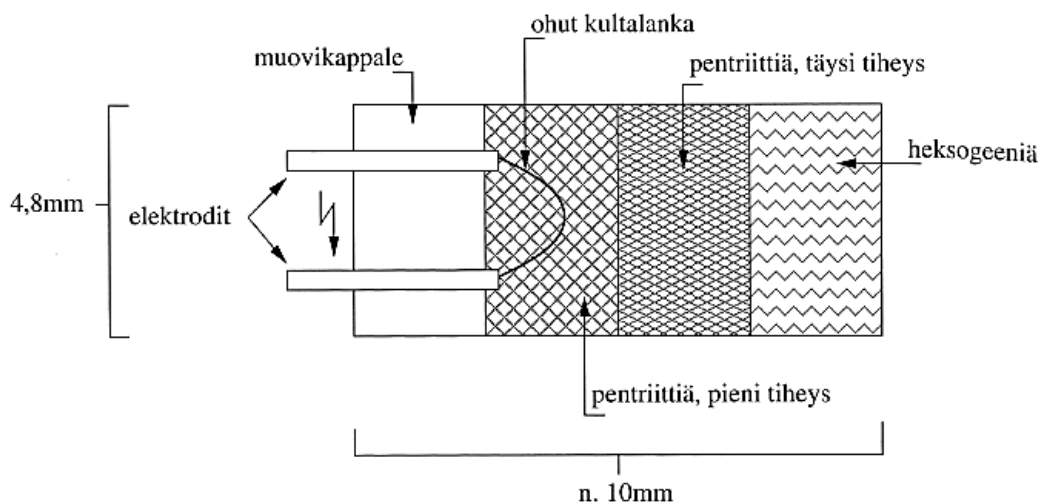
Massapurkaussytytystä käytetään paikoissa joissa tarvitaan erittäin täsmällistä sytytystä tai jossa sytyttimen on mahduttava pieneen tilaan, esimerkiksi taistelukärjissä. Muina etuina ovat sytyttimen yksinkertaisuus ja ne ovat helppoja valmistaa. Massapurkaussytyttimen haittana on syttymisherkkyys. Syttymismenetelmä ollaan korvaamassa räjähdelankasytytimillä.[5]

### Massapurkaussytytin



**Kuva 5. Massapurkaussytytin. [5]**

Räjähdyslankasytytin on kehitetty vuonna 1945 ydinaseita varten. Menetelmässä käytetään räjäytettävää hehkulankaa iskuaallon tuottamiseksi. Räjäytettävä hehkulanka on upotettu suoraan toisioräjähdysaineeseen, joka räjähtäessään sytyttää primäärisytytsräjähdysaineen, Kuva 6. Hehkulankaan johdetaan korkea jännite. Lanka höyrystyy ja muodostaa plasmapurkauskanavan, joka laajetessaan yliaänennopeudella aiheuttaa detonaation toisioräjähdysaineessa. Räjähdyslankasytytimiä käytetään erityisesti taistelukärjissä joissa niiden etuna on detonaatioaallon muokattavuus. Etuina räjähdyslankasytytimissä ovat niiden turvallisuus, luotettavuus ja ne voidaan asentaa pieneen tilaan.[5]



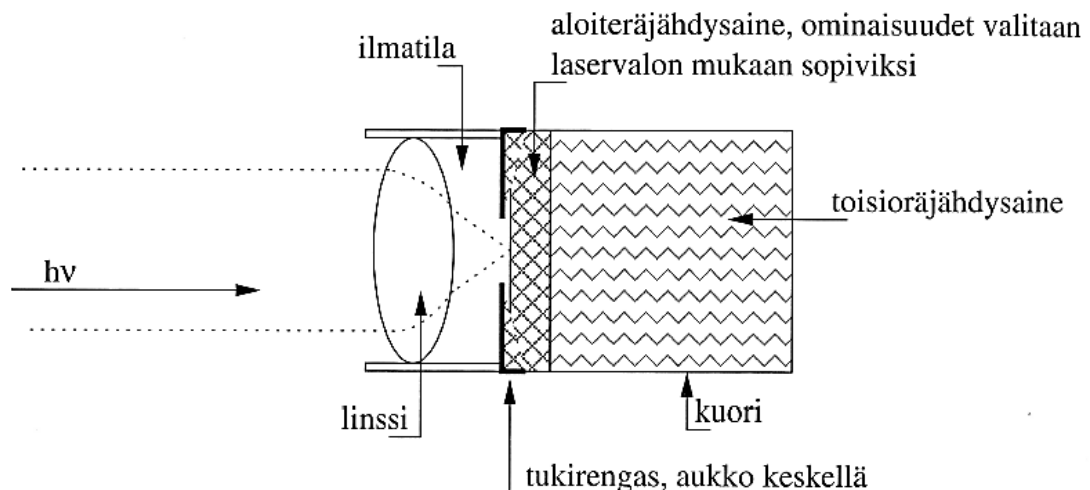
**Kuva 6. Räjähdyslankasytytin. [5]**

## 2.2.4 Lasersytytys

Laserilla tarkoitetaan laitetta joka tuottaa koherenttia (samanvaiheista ja samansuuntaista) ja monokromaattista säteilyä mahdollisten aallonpituuksien ollessa ultravioletti-alueelta infrapuna-alueelle. Lasersäde on tyypillisesti hyvin kollimoitu ja voi omata laserin tyypistä ja tehosta riippuen suuren energiatihedden. Lasereita on hyvin monentyyppisiä, esimerkiksi eksimeeri-, fotonikide-, väriaine-, vapaaelektroni-, kemiallinen-, kaasu-, kiinteän olomuodon-, puolijohde-, ja kuitulaser [8]. Niiden käyttökohteina ovat muun muassa lääketiede, metalliteollisuus ja sotilassovellukset. Käytännönsovelluksissa laser on tunnettu erityisesti metallien leikkaamisesta ja hitsaamisesta, sairaalan leikkaussalin työkaluna, tiedonsiirrossa, laseretäisyysmittarina ja laserosoittimena.[9]

Lasersytytystä on laajasti tutkittu energeettisten materiaalien sytytyksessä, joista ensimmäiset tutkimukset ovat jo 1960-luvulta [2, 10]. Lasersytytyksellä pyritään aikaansaamaan tarvittavan suuri energiatiheys sytytettävän materiaalin pinnalla, jotta hapetus-pelkistys-reaktio alkaisi ja jatkuisi itsenäisesti. Lasersytytyksen ja -sytyttimen periaate on esitetty Kuvassa 7 [5].

Lasersytytyksen merkittävänä etuna on sen turvallisuus verrattuna perinteiseen sähkösytytykseen ja tulilankasytytykseen. Sähköllä toimivassa sytytyksessä ympäristön elektromagneettisen säteilyn johtimiin indusoimat häiriöt tai staattinen sähkö voi aiheuttaa sähkösytyttimessä tarkoituksettoman syttymisen. Tätä ongelmaa lasersytytyksessä ei ole, koska laseriin kytketty valokuitu on hyvä sähköeriste [2]. Esimerkiksi tulilankojen haittapuolena, lasersytytykseen verrattuna, ovat niiden syttymisajan epätarkkuus [4].



*Kuva 7. Lasersytytys.[5]*



## 2.3 Energeettisten aineiden palaminen, detonaatio ja välittyminen

Tässä osiossa esitetään yleisesti palaminen, deflagraatio, detonaatio ja välittyminen. Palaminen, deflagraatio ja detonaatio eroavat oleellisesti toisistaan muun muassa reaktionopeuden ja etenemistyylin osalta, vaikka palaminen ja deflagraatio, sekä deflagraatio ja detonaatio voivat muistuttaa hyvin paljon toisiaan.

### 2.3.1 Palaminen

Palaminen on yleisesti tunnettu kemiallinen eksoterminen reaktio, jossa polttoaine ja hapetin reagoivat. Kun polttoaineen ja hapettimen sekoitukseen tuodaan riittävästi lämpöä, alkaa polttoaine reagoida hapettimen kanssa käynnistäen lämpöä vapauttavan palamisreaktion. Osa vapautuvasta lämpöenergiasta johtuu reagoimattomiin polttoaine partikkeleihin ylläpitäen reaktiota. Palamisessa vapautuu lämpöä, valoa ja savukaasuja ympäristöön. Palaminen voi tapahtua kiinteässä, nestemäisessä tai kaasumaisessa aineessa, esimerkiksi puu, öljy ja maakaasu vastaavasti. Kiinteän polttoaineen palamiseen liittyy yleensä useampi vaihe:

1. Kuivuminen
2. Pyrolyysi
3. Kaasumaisen polttoaineen palaminen
4. Jäännöshiilen palaminen

Kuivumisessa polttoaineeseen sitoutunut vesi alkaa haihtua ja polttoaineen massa vähenee. Pyrolyysissä polttoaineeseen sitoutuneet kiinteät hiilivety-yhdisteet alkavat muuttua kaasumaisiksi, esimerkiksi hiilimonoksidiksi, vedyksi ja metaaniksi. Kaasumaisen polttoaineen palamisessa pyrolyysissä muodostuneet kaasumaiset polttoaineet palavat ja vapauttavat energiaa reaktion ylläpitämiseksi. Lopuksi polttoaineeseen jäänyt kiinteä hiili alkaa reagoida hapettimen kanssa ja palaa hehkuen ilman liekkiä. Kun taas nestemäinen polttoaine ensin höyrystyy ja sitten syttyy palamaan. Kaasumainen polttoaine palaa ilman välivaiheita. Tavallisen palamisen reaktiorintamanopeus on alle 0.001 metriä sekunnissa. [2, 11]

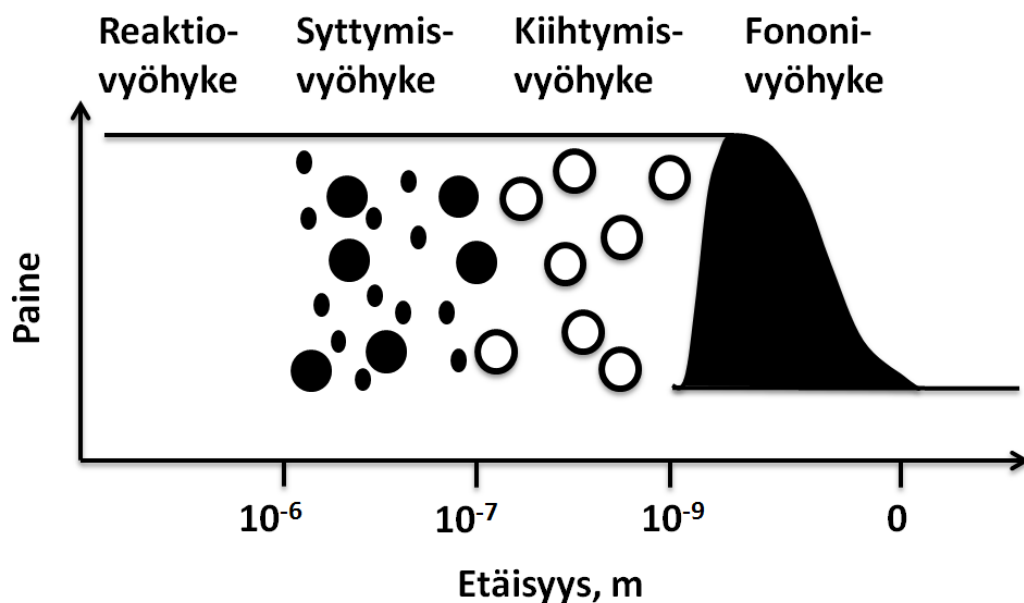
### 2.3.2 Deflagraatio

Deflagraatio eli nopea palaminen tai humahdus eroaa tavallisesta palamisesta reaktiorintaman nopeuden perusteella. Deflagraation reaktionopeus on yli 0.001 metriä sekunnissa mutta alle 1500 metriä sekunnissa. Deflagraatio voidaan edelleen jakaa hitaaseen ja nopeaan deflagraatioon hitaan deflagraation reaktionopeuden ollessa välillä 0.001-10 m/s ja nopean deflagraation reaktionopeus on 10-1500 m/s.

Deflagraatiossa palaminen tapahtuu pääasiassa lämmön johtumisen kautta, alle äänennopeudella etenevässä palorintamassa. Deflagraatiossa energia vapautuu kerros kerrokselta tapahtuvan pyrolyysin ja hapettumisen kautta. Esimerkiksi mustaruuti deflagroituu sytytettäessä. Polttomoottorin toiminta perustuu polttoaineen deflagraatioon. Muita käytännön esimerkkejä deflagraation käytöstä ovat ilitulitteet ja soihdut. [2,12]

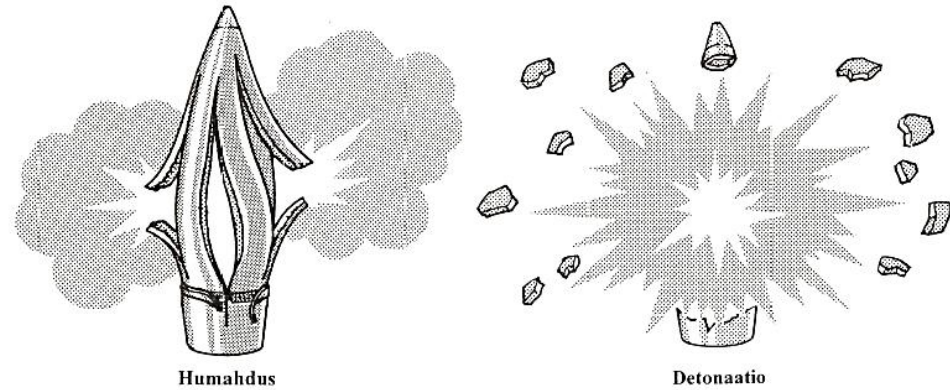
### 2.3.3 Detonaatio

Detonaatio eli räjähtäminen kuvaa palamisreaktiota, jossa reaktiorintama etenee shokkiaallona yliaänennopeudella - määritelmän mukaan yli 2000 m/s nopeudella. Esimerkiksi dynamiitti räjähtää nallilla sytytettäessä, shokkiaallon nopeuden ollessa tyypillisesti n. 6000 m/s. Detonaatiossa räjähdysaineen energia vapautuu räjähdysaineen läpi kulkevan shokkiaallon aiheuttaman puristuksen seurauksena, jolloin räjähdysaine lämpenee ja aiheuttaa räjähdysaineen kemiallisen reaktion. Kemiallinen reaktio tukee täten shokkiaallon etenemistä samalla, kun shokkiaallon takana kaasuuntuneet aineet laajenevat. Kuvassa 8 on esitettyä heikon shokkiaallon aiheuttamat reaktiovyöhykkeet räjähdysaineessa. Fononivyöhykkeessä molekyyliä värähtelevä ei ole vielä kiihtynyt shokkiaallon vaikutuksesta, kun taas kiihtymisvyöhykkeessä molekyyliä alkavat värähdellä yhä voimakkaammin fononien pumpatessa molekyylien energiatasoa ylös. Syttymisvyöhykkeessä molekyylien terminen hajoaminen (termolyysi) alkaa värähtelyn kasvaessa niin suureksi, että atomisidokset hajoavat. Reaktiovyöhykkeessä tapahtuu varsinainen räjähdysaineen eksotermisen reaktion. [2,13]



Kuva 8. Shokkiaallon aiheuttamat vyöhykkeet.[2]

Räjähdysaineita käytetään esimerkiksi kaivos- ja rakennusteollisuudessa sekä aseteollisuudessa. Käytännön esimerkkejä räjähdysaineiden käytöstä ovat pommit, kallion ja malmin louhinta, rakennusten purkaminen ja räjäytyshitsaus. Kuvassa 9 on havainnollistettu deflagraation ja detonaation vaikutus tykistön ammukseseen.



**Kuva 9. Deflagraatio (humahdus) ja detonaatio tykistön ammuksessa.[14]**

Taulukossa 1 on esitetty palamisen, deflagraation ja detonaation tyypillisiä ominaisuuksia.

**Taulukko 1. Palamisen, deflagraation ja detonaation vertailu.[2]**

	<b>Palaminen</b>	<b>Deflagraatio</b>	<b>Detonaatio</b>
Materiaali/polttoaine ja hapetin	Hiili ja vety hapen kanssa	Ajoaine. Hapetin yleensä yhdistetty materiaalin molekyyli-rakenteeseen	Räjähde. Hapetin yhdistetty materiaalin molekyyli-rakenteeseen
Lineaarinen reaktiorintama-nopeus [m/s]	$10^{-3}$	0.001 - 1500	2000 - 9000
Reaktion etenemistyyli	Lämmönjohtuminen	Lämmönjohtuminen	Shokkiaaltorintama ja fononivirtaus
Reaktioenergia [kJ/kg]	$10^4$	$10^3$	$10^3$
Teho [W/cm <sup>3</sup> ]	10	$10^3$	$10^9$
Tyypillinen syttymismekanismi	Lämpö	Kuumat partikkelit tai kaasut, kuuma piste	Paineistettu korkea lämpötila, paineaalto, kuuma piste
Tyypillinen reaktiorintamaa seuraava ylipaine [bar]	0-7	7-7000	$70-7 \cdot 10^5$

Taulukosta 1 nähdään, että deflagraatiossa ja detonaatiossa reaktiorintamaa seuraava ylipaine voi olla hyvin suuri ja painealueet menevät limittäin, joka voi tehdä hankalaksi reaktion määrittelemisen deflagraatioksi tai detonaatioksi pelkän ylipaineen avulla. Palamisessa reaktiorintamaa seuraava ylipaine pysyy suhteellisen pienenä, alle 7 bar.

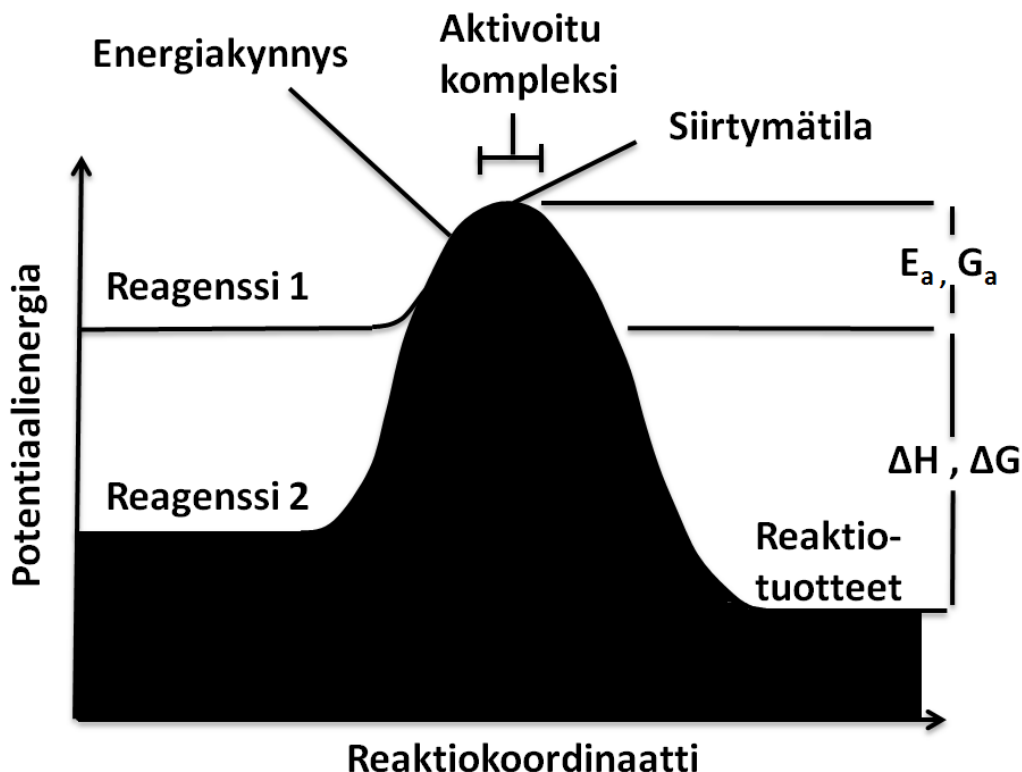
### 2.3.4 Välittyminen

Välittymisellä tarkoitetaan palamisen siirtymistä deflagraatioon tai edelleen detonaatioon tai minkä tahansa edellä mainittujen reaktionopeuksien muuttumista toiseen reaktionopeuteen. Välittyminen voi tapahtua samassa materiaalissa tai materiaalista toiseen.

### 2.3.5 Deflagraation välittyminen detonaatioon

Deflagraatio-reaktion välittyminen detonaatioon tarkoittaa nopean palamisen tilasta siirtymistä räjähdykseen. Deflagraation välittyminen voidaan saada aikaan samassa reagoivassa energieettisessä materiaalissa tai kahdesta eri materiaalista toiseen.[2]

Jotta deflagraatio tai detonaatio tapahtuisi on kahdelle molekyylille mahdollistettava suotuisat olosuhteet sekä tarvittava aktivointienergia ( $E_a$ ). Aktivointienergia tarkoittaa molekyylien potentiaalienergioiden ja energiakynnyksen erotusta eli energian määrää, jolla molekyylit aloittavat hajoamisen tai yhdistymisen ts. kemiallisen reagoimisen. Kahdella tasapainotilassa olevalla reagenssillä (reagoivalla materiaalilla) on potentiaalienergia, joka on pienempi kuin reaktioon tarvittava energiakynnys. Lisäämällä tarvittava määrä energiaa ylitetään tämä energiakynnys. Tällöin muodostuu infinitesimaalinen (äärettömän pieni) aktivoidun kompleksin alue, jossa kemiallisessa reaktiossa muodostuu välitason molekyylisidoksia eli muodostuu ja hajoaa alku- ja lopputuotteiden alkuaineista koostuvia molekyylejä.[15] Aktivoidun kompleksin aikana muodostuu siirtymätila, jonka aikana saavutetaan suurin potentiaalienergia ja suurin Gibbsin energian arvo. Siirtymätilasta reaktio voi edetä kohti tuotteita tai alkuaineita.[16] Eksotermisestä reaktiosta vapautuu energiaa  $\Delta H$  (entalpia), joka ylläpitää reaktiota mikäli vapautuva energia on tarpeeksi suuri ylittämään energiakynnyksen. Kuvassa 10 on havainnollistettu kahden reagenssin reaktioprofiili.



**Kuva 10. Reaktioprofiili kahdelle reagenssille. Kuvassa  $\Delta H$  on reaktio-entalpia,  $\Delta G$  Gibbzin vapaa energia,  $E_a$  on aktivointienergia ja  $G_a$  on Gibbzin energia.[2]**

Jotta välittyminen deflagraatiosta detonaatioon tapahtuisi eri materiaalien välillä on materiaalin deflagraatiosta vapautunut energian määrä oltava suurempi kuin räjäytettävän materiaalin detonaatioon tarvittava aktivointienergia. Aktivointienergia Mg/Teflon-reaktiolle on 135.8 kJ/mol.

## 2.4 Syttymis- ja välittymismallin käsitteet

Tässä osiossa esitetään yleisimmät syttymis- ja välittymismallissa tarvittavat käsitteet. Entalpian, ominaisentalpian, reaktioentalpian ja adiabaattisen palamislämpötilan kaavat ovat keskeisimpiä mallissa käytettyjä kaavoja.

### 2.4.1 Entalpia ja Ominaisentalpia

Entalpia, tunnus  $H$ , kuvaa systeemin sisäenergian summaa systeemin paineen ja tilavuuden tulon, eli työn, kanssa.[17]

$$H = U + pV \quad (2.1)$$

Kaavassa 2.1  $U$  on systeemin sisäenergia  $p$  systeemin paine ja  $V$  tilavuus. [17]

Entalpian arvoja voidaan muuttaa sisäenergiaan vaikuttavien arvojen tai paineen ja tilavuuden arvoja muuttamalla. Kun esimerkiksi systeemin lämpötilaa nostetaan, paineen ja tilavuuden pysyessä vakioina, niin systeemin sisäenergia kasvaa, jolloin entalpian arvo kasvaa. Entalpian muutos on loppu- ja alkutilan entalpioiden erotus: [17]

$$\Delta H = H_{Loppu} - H_{Alku} \quad (2.2)$$

Ominaisentalpialla tarkoitetaan materiaalin sisältämän entalpian jakamista materiaalin massalla, kaava 2.3, tai moolimäärällä, kaava 2.4.

$$H_i = \frac{U}{M} \quad (2.3)$$

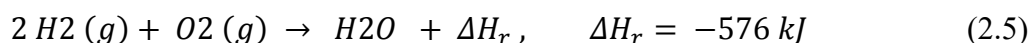
$$H_i = \frac{U}{n} \quad (2.4)$$

Moolimäärällä jaettua ominaisentalpiaa on helppo käyttää silloin kun tiedetään materiaalin moolimäärä ja massalla jaettua ominaisentalpiaa silloin kun tiedetään materiaalin massa.

## 2.4.2 Reaktioentalpia

Reaktioentalpia, tunnus  $\Delta H_r$ , kuvaa molekyylien yhdistymisessä tai hajoamisessa vapautuvan energian määrää. Eksotermisen reaktio-entalpian arvo on miinus-merkkinen ja endotermisen taas positiivinen. Eksotermisellä reaktiolla tarkoitetaan energiaa luovuttavaa reaktiota ja endotermisellä reaktiolla taas energiaa sitovaa reaktiota.

Esimerkkinä vedyn palaminen vedeksi:



## 2.4.3 Adiabaattinen palamislämpötila

Adiabaattisella palamislämpötilalla tarkoitetaan korkeinta teoreettista lämpötilaa, joka on saavutettavissa polttoaineen palaessa, kun ympäristöstä ei siirry lämpöä systeemiin tai systeemistä ympäristöön. Adiabaattisen palamislämpötilan laskennassa siis oletetaan että polttoaineen palaessa kaikki energia muuttuu lämmöksi.

Adiabaattinen palamislämpötila voidaan laskea kaikkien savukaasu-komponenttien entalpioiden muutosten summan ja polttoaineen palamisen aiheuttaman reaktioentalpian avulla. Kun kullekin molekyylille on laskettu ominaisentalpia jossain tietyssä adiabaattisessa palamislämpötilassa, lasketaan reaktion lopputuotteille yhteisentalpia ( $\Delta H_{total}$ ) kertomalla kunkin molekyylin sitoma entalpia ( $\Delta H_i$ ) ja moolimäärä ( $n_i$ ) keskenään ja summaamalla tulot:

$$\Delta H_{total} = \sum(\Delta H_i * n_i) \quad (2.6)$$

Nyt saadun yhteisentalpian muutoksen ja reaktioentalpian tulisi olla yhtä suuria. Mikäli näin ei ole, tulee adiabaattisen palamislämpötilan arvoa muuttaa, jolloin yhteisentalpia muuttuu siten, että energiat täsmäävät.

$$\Delta H_r - \Delta H_{total} = 0 \quad (2.7)$$

Kaavassa 2.7  $\Delta H_r$  on reaktioentalpia ja  $\Delta H_{total}$  on yhteisentalpian muutos.

## 2.5 Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien esittely

Tässä osiossa esitetään yleisesti sytytysmassan tutkimuksissa käytetyt materiaalit. Lisäksi esitetään lujuuslaskennassa tarvittavat PLA-muovin ominaisuudet.

### 2.5.1 Magnesium/Teflon ja alumiini/Teflon

Magnesiumin ja Teflonin (PTFE) seosta on käytetty pyrolyyttisena massana jo pitkän aikaa. Esimerkiksi Yhdysvaltain armeija on käyttänyt seosta soihutumateriaalina, kun seokseen on lisätty Vitonia sideaineeksi.[18]

Alumiinin ja Teflonin seoksen syttymistä on tutkittu esisyttyttimenä ja räjähdysaineena, mutta yleisiä käytännönsovelluksia ei ainakaan energettisten aineiden saralla ole.[19, 20] Alumiinia ja Teflonia on tunnetusti käytetty esimerkiksi paistinpannuissa, joissa alumiini toimii runkona ja Teflon pinnoitteena. Teflon on DuPont nimisen yrityksen kauppanimi PTFE:lle (Polytetrafluorieteeni), joka on materiaalina yleisesti käytetty pinnoitteena, maalina ja voiteluaineenakin johtuen Teflonin vähäisestä kitkakertoimesta ja kestävyydestä.[21]

Magnesiumin tai alumiinin ja Teflonin seoksen laserilla tapahtuvaan syttymiseen vaikuttavat muun muassa tiheys, seossuhde, partikkelikoko, paine ja seoksen absorptio käytetyllä aallonpituudella. Seoksen absorptio saadaan selvitettyä vähentämällä seoksesta heijastuneen säteilyn intensiteetti lasersäteen intensiteetistä.

$$\text{Absorptio}_{\text{seos}} = \text{Lasersäteen intensiteetti} - \text{Heijastuneen säteilyn intensiteetti}_{\text{seos}}$$

Seoksen heijastavuus heikentää lasersäteen absorptiota seoksen pinnalla suurentaen tarvittavaa syttymisenergian määrää. Absorptiota voidaan kuitenkin parantaa lisäämällä esimerkiksi hiilimustaa seokseen. Absorptiota voi myös vähentää seoksen puristaminen pelletiksi, joka aiheuttaa seoksessa partikkeleiden suuntautumista ja tiivistymistä lisäten heijastuspintaa.[2,10] Tiheyden nousun on todettu lisäävän syttymisenergian tarvetta [22], mutta toisaalta paineen kasvattamisen on todettu vähentävän energiantarvetta ainakin sotilasräjähteillä.[2] Partikkelikoko taas vaikuttaa voimakkaasti

palamisnopeuteen eli mitä pienempi partikkelikoko sitä suurempi palamisnopeus.[22]  
Oletettavasti liian suuri partikkelikoko voi estää palorintaman leviämistä tai syttymistä.

Magnesiumin ja Teflonin reaktio on seuraavanlainen [22]:



Alumiinin ja Teflonin reaktio on seuraavanlainen [23]:



## 2.5.2 Royal Demolition Explosive

RDX, joka tunnetaan myös heksogeenin tai cycloniitin nimellä, kehitettiin vuonna 1898 Georg Friedrich Henningin toimesta [24]. Sitä käytettiin laajalti vasta toisessa maailman sodassa ja sitä käytettiin maailman ensimmäisissä muoviräjähteissä.[25]

Nykyään RDX on maailman toiseksi yleisin sotilasräjähdysaine ja se on tehokkaampi kuin suosituin räjähdysaine trotyyli (TNT). RDX:ää käytetään nalleissa, räjäyttimissä ja kranaateissa täytteenä sekä erilaisina sekoituksina muiden räjähdysaineiden kanssa. RDX:n kemiallinen kaava on  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$  [26]. RDX:n huono puoli on sen räjähdysherkkyys. Herkkyyttä saadaan pienennettyä sekoittamalla RDX:ää muiden räjähdysaineiden kanssa. RDX:n etuja ovat sen räjähdysteho, veteen liukenemattomuus ja hyvä varastoitavuus.[24]

## 2.5.3 Hiilimusta

Hiilimusta toiselta nimeltään noki, kimrööki tai carbon black on yksi maailman yleisimmistä teollisuudessa käytetyistä kemikaaleista. Hiilimusta on pääasiassa puhdasta hiiltä ja sitä käytetään yleisesti esimerkiksi väriaineena, muoveissa, asfaltin lisäaineena tai autonrenkaissa. Hiilimustaa voidaan valmistaa polttamalla tai kuivatislaamalla orgaanista materiaalia, esimerkiksi puuta, öljyä tai maakaasua. Hiilimusta on ihmisen terveydelle vaaratonta, mutta hengitettynä se voi aiheuttaa pölykeuhkon.[27,28]

## 2.5.4 Polylaktidi

Polylaktidi, eli PLA, on yleinen 3D-tulostuksessa käytetty muovi. PLA on uusiutuvista raaka-aineista valmistettu biohajoava ja kestävä muovimateriaali.

Lujuuslaskennassa materiaalina käytettiin PLA-muovia, jonka taivutusmyötöjännitys on 110 MPa, puristusmyötöjännitys 176 MPa ja kimmomoduuli 3310 MPa [29]. Kyseiset myötöjännitykset ovat pysyvälle muodonmuutokselle annettuja arvoja eivät murtojännityksen arvoja, jotka ilmaisevat kappaleen hajoamiseen tarvittavaa jännitystä.



Laskennassa jännityksille rajoittavana tekijänä on siis 110 MPa. Taulukossa 2 on esitetty lujuuslaskennassa käytetyt PLA-muovin ominaisuudet.

**Taulukko 2. PLA-muovin ominaisuuksia.**

Kimmomoduuli	3310 MPa
Poissonin suhde	0.44
Tiheys	1.240 g/cm <sup>3</sup>
Liukukerroin	805 MPa
Taivutusmyötöjännitys	110 MPa
Puristusmyötöjännitys	160 MPa

PLA-muovin taivutusjännitys 110 MPa on suhteellisen suuri arvo 3D-tulostuksessa käytetyille muoveille. Esimerkiksi ABS-muovin, joka on toinen yleinen 3D-tulostuksessa käytettävä muovi, taivutusjännitys on vain 46 MPa.[30]

## 2.6 Sytyttimen kuorirakenteessa käytetyn lujuusopin teoriaa

Tässä osassa esitetään yleisimmät Inventor-ohjelman käyttämät lujuusopin käsitteet. Sytyttimen kasauksessa ja käsittelyssä eniten vaikuttavia jännityksiä ovat puristusjännitys ja taivutusjännitys. Von Misesin lujuushypoteesillä taas arvioidaan sytyttimeen aiheutuva jokaiseen suuntaan kohdistuva yhdistetty jännitys.

### 2.6.1 Puristusjännitys

Kappaletta puristettaessa (Kuva 11) syntyy kappaleeseen puristusjännitys, joka aiheuttaa kappaleen pituuden lyhenemisen. Mikäli voima on tarpeeksi suuri voi hauras kappale murtua tai sitkeä kappale tyssääntyä. Puristusjännitystä voidaan kuvata kaavalla 2.10.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Kaavassa 2.10  $\sigma$  on puristusjännitys,  $A$  on pinta-ala ja  $F$  on voima. [31]



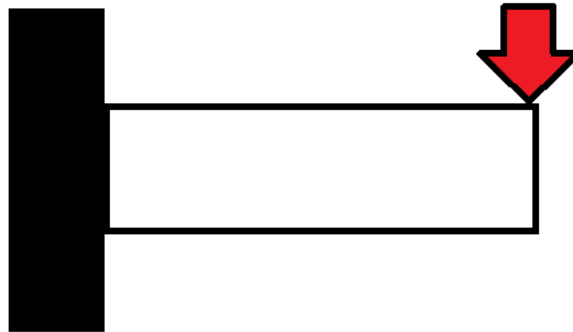
**Kuva 11. Kappaleen puristus.**

## 2.6.2 Taivutusjännitys

Taivutuksessa (Kuva 12) kappaleen kerrokseen kohdistuu joko venytystä tai puristusta, riippuen taivutuksen suunnasta ja tuennasta. Taivutusjännityksen kaavat voivat olla hyvin monimutkaisia riippuen kappaleiden koosta, tuennasta, materiaalista ja muodosta. Yksinkertaisen palkin taivutusjännityksen laskenta x-akselin suuntaan on esitetty kaavassa 2.11.

$$\sigma_x = \frac{M_z y}{I_x} \quad (2.11)$$

Kaavassa 2.11  $\sigma_x$  on taivutusjännitys,  $M_z$  on taivutusmomentti neutraaliakselin suhteen,  $I_x$  on x-akselin neliömomentti ja  $y$  on kohtisuora etäisyys neutraaliakselista. [32]



*Kuva 12. Toisesta päästä tuetun palkin taivutus.*

Kuvassa 12 palkki on kiinnitetty kiinteästi seinään ja siihen kohdistuu voima jota kuvataan punaisella nuolella.

## 2.6.3 Von Misesin lujuushypoteesi

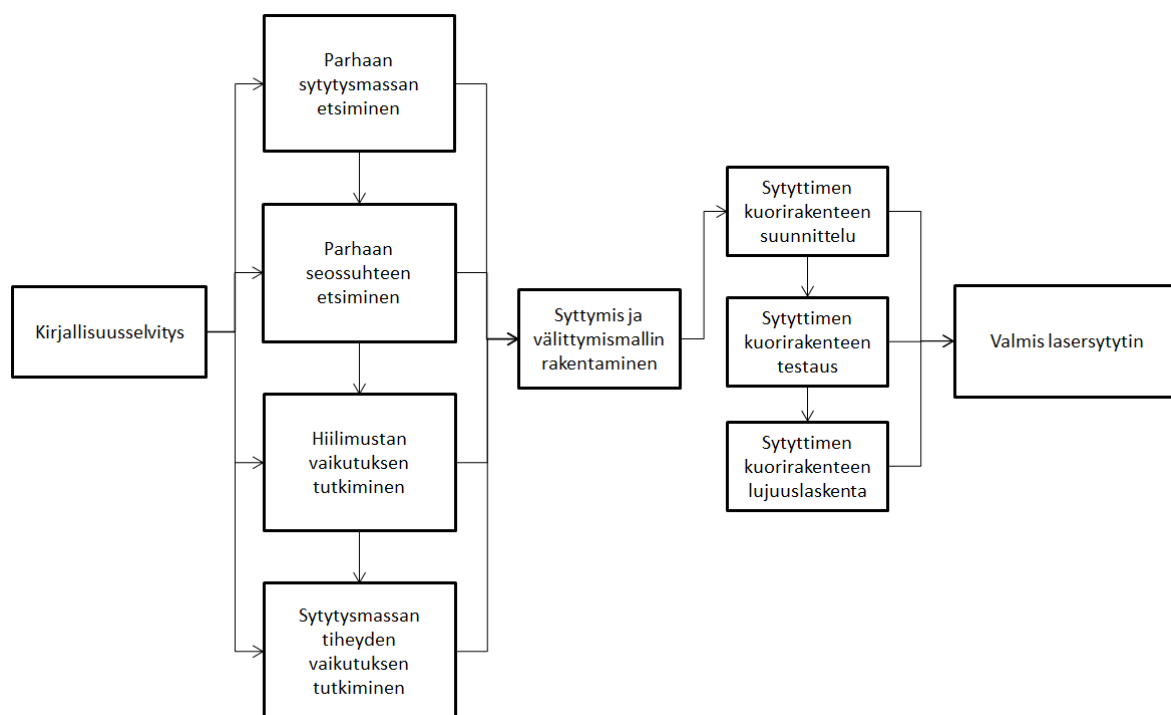
Von Misesin lujuushypoteesi on apuväline jolla voidaan arvioida materiaalin kestävyyttä tietyssä jännitystilassa. Von Misesin lujuushypoteesi soveltuu parhaiten sitkeille materiaaleille, joissa veto- ja murtolujuudet ovat samaa luokkaa. Kyseisessä lujuushypoteesissa yhdistetään kaikkiin suuntiin syntynyt jännitys ja leikkausjännitys sekä oletetaan, että kimmoista materiaalia kuormitettaessa siihen varastoituu kimmoenergiaa. Von Misesin yhdistetty jännitys voidaan laskea kaavalla 2.12, jossa tulosta verrataan mitoituksessa käytettävään sallittuun jännitykseen.

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 * (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (2.12)$$

Kaavassa 2.12  $\sigma_{xyz}$  on joko x, y, tai z-akselin suuntainen jännitys ja  $\tau_{xyz}$  on joko xy-, yz- tai xz-pinnan suuntainen leikkausjännitys.[33]

### 3. KOEJÄRJESTELYT, TIETOKONEMALLINNUS, SEKÄ SYTYTTIMEN KUORIRAKENTEEN SUUNNITTELU JA TESTAUS

Tutkimus aloitettiin selvittämällä paras alkuaine alumiinista ja magnesiumista reagoimaan Teflonin kanssa, jonka jälkeen selvitettiin parhaalle alkuaineelle sopivin seossuhde Teflonin kanssa. Kun paras seossuhde saatiin selville tutkittiin hiilimustan lisäyksen ja seoksen tiheyden vaikutukset laserilta vaadittavan syttymistehon määrään. Parhaan tiheyden ja seossuhteen omaavalle massalle tehtiin tietokonemallinnus massan syttymisestä ja välittymisestä RDX-pellettiin. Parhaalle sytytysmassalle suunniteltiin ja valmistettiin kuorirakenne, jotta sytytintä voitaisiin käyttää käytännön sovelluksissa. Kuorirakenteeseen suunniteltiin kuituliitانتä laserin optista kuitua varten, jotta sytyttimen käyttö ja kasaaminen helpottuisi. Kuorirakenteelle tehtiin myös lujuuslaskennat sytyttimen käyttöä ja valmistusta varten. Työn vaiheet on havainnollistettu Kuvassa 13.



*Kuva 13. Työn vaiheet.*

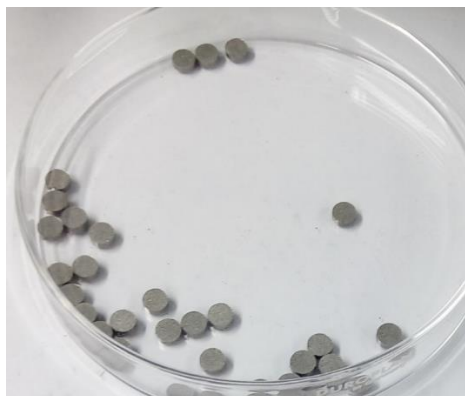
### 3.1 Alumiini/Teflon ja magnesium/Teflon lasersytytys-materiaalien tutkimuksen koejärjestelyt

Kokeet aloitettiin valmistamalla magnesium- ja Teflon-jauheesta energoettisen aineen seos, joka puristettiin pelletiksi tai annettiin olla luonnollisessa tiheydessä jauheena (Kuva 14 ja Kuva 15). Kutakin seosta käytettiin noin 0.15 grammaa per testi.



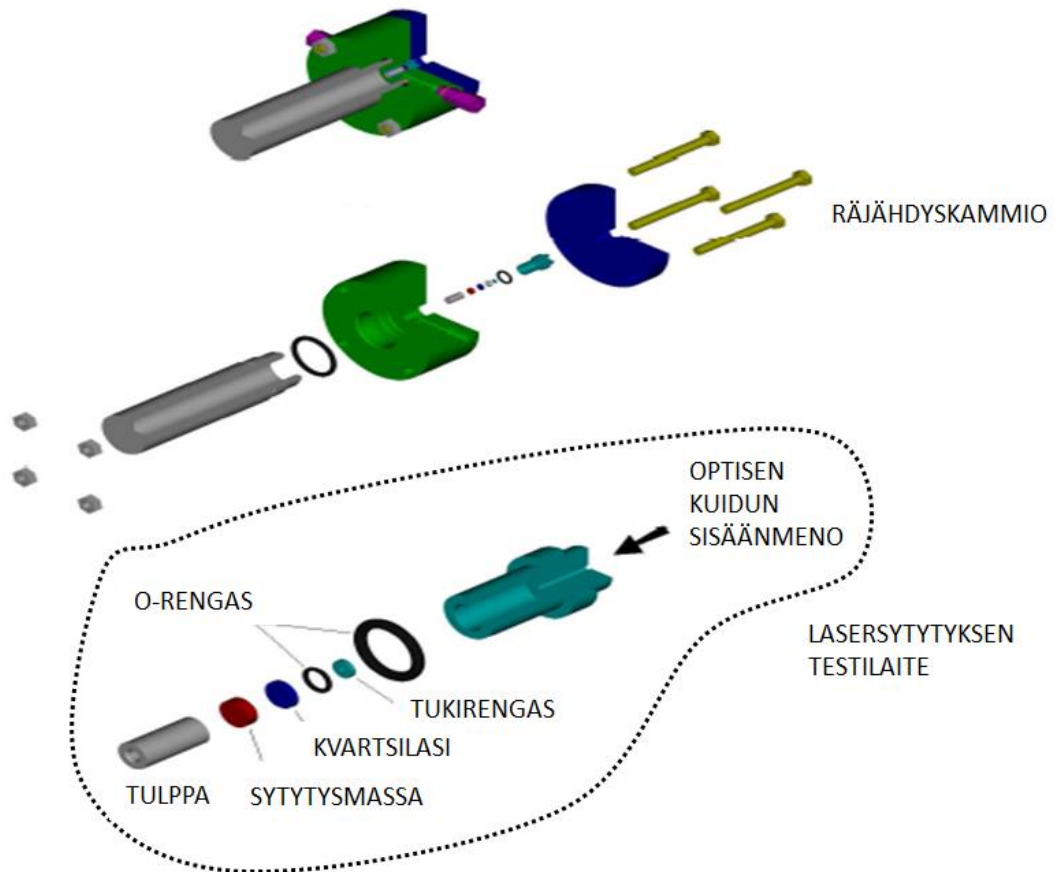
*Kuva 14. Magnesium/Teflon seosta jauheena.*

Puristamalla seosta pelletiksi sen tilavuus pienenee ja sytyttimen kuorirakenne voidaan suunnitella pienemmäksi. Mitä suuremmalla voimalla tietty seosmäärä puristetaan pelletiksi sitä pienempi sen tilavuus on.



*Kuva 15. Magnesium/Teflon/hiilimusta seoksesta valmistettuja pellettejä. Käytetty puristusvoima on 600 kg.*

Seuraavaksi aloitettiin testikappaleen kokoaminen asettamalla kuminen O-rengas rungon pohjalle, jonka tehtävänä on toimia tiivisteinä ja painamalla renkaan sisälle tukirengas, joka levittää kumista O-rengasta ja varmistaa reunojen tiiveyden. Renkaan päälle asetetaan 6 mm halkaisijaltaan ja 1 mm paksuudeltaan oleva kvartsilasi, jonka päälle asetetaan itse energoettinen materiaali (energoettiset materiaalit = räjähdysaineet, pyrotekniset massat ja ruudit), jonka jälkeen testilaite suljetaan tulpalla. Kuvassa 16 nähdään havainnekuva testitilanteesta.



**Kuva 16. Räjähdyshämmion ja testilaitteen havainnekuvat: Ylimpänä kasattu painekammio, keskellä painekammio osina ja alimpana testilaite osina.[2]**

Kuvassa 17 on havainnollistettu tutkimuksissa käytetyn testilaitteen kokoaminen Mg/Teflon-pellettiä käyttäen.



**Kuva 17. Testilaitteen osat. Vasemmalta lähtien, runko, o-rengas, tukirengas, kvartsilasi, Mg/Teflon-pelletti, tulppa, ja viimeisenä oikealla valmis kasattu testilaite.**

Kun testilaite on valmis, asennetaan se räjähdyshämmioon, joka suljetaan kannella. Testeissä ei paineistettu kammiota vaan testit suoritettiin normaalissa ilmakehän paineessa (1 bar) ja 25 °C lämpötilassa. Valokuitu tuodaan testilaitteen pohjassa olevan reiän kautta testilaitteen sisään kvartsilasia vasten. Tämän jälkeen seos pyritään

sytyttämään käyttäen Coherent Tutcore A200 diodilaseria. Syttymistilanteessa seos on eristettynä testilaitteessa, joten palamisreaktioon ei pääse ulkopuolelta happea.

Syttymiskokeiden suorittamiseen on käytetty Up-And-Down menetelmää, jossa jokaisen onnistuneen syttymisen jälkeen diodilaserin tehoa vähennetään kunnes syttyminen ei onnistu, jonka jälkeen diodilaserin tehoa nostetaan kunnes syttyminen taas onnistuu. Tätä menetelmää toistetaan noin 30-40 kertaa tai kunnes selkeä syttymisprofiili on löydetty. Näin saadusta syttymisprofiilista määritetään 5%, 50% ja 95% syttymistodennäköisyydet tilastollisin menetelmin, jolloin saadaan tulokseksi muuttujana käytetty diodilaserin sähkövirran arvo, josta voidaan laskea tarvittava tehon arvo. Tarkemmat tiedot Up-And-Down menetelmästä Liitteessä 1. Liitteessä 2 on esitettynä syttymisvirran suhde laserin tehoon ja Coherent Tutcore A200 laitteen huippusähkötehoon.

Tutkimusparametrit:

- Seossuhteen vaikutus syttymisenergiaan
- Hiilimustan lisäyksen vaikutus syttymisenergiaan
- Tiheyden vaikutus syttymisenergiaan

Tutkimustilanteessa käytetyt laitteiden, ympäristän ja materiaalien arvot on kuvattu Taulukossa 3.

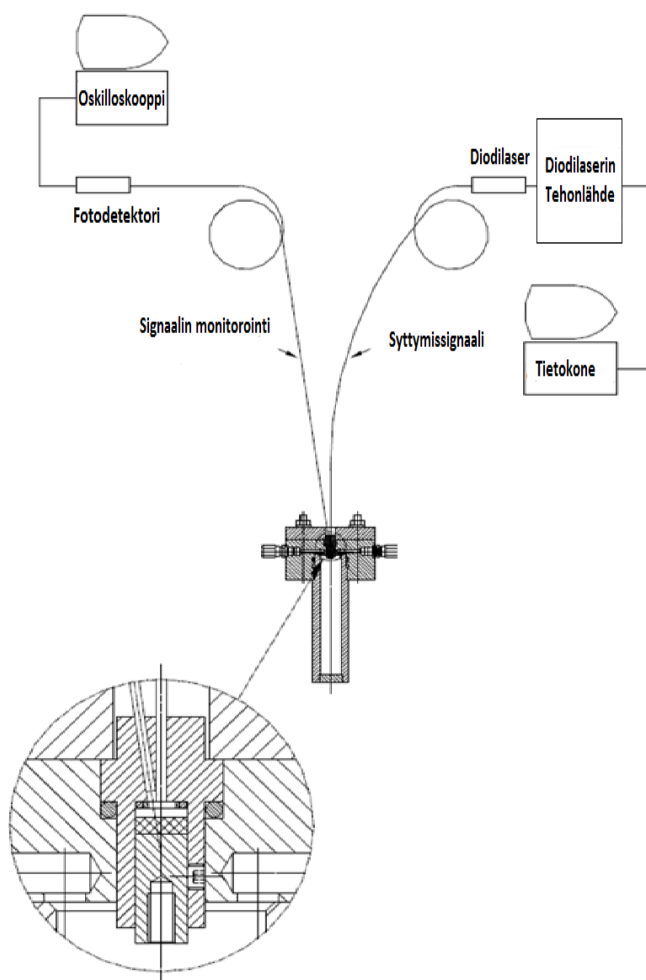
***Taulukko 3. Tutkimustilanteen arvoja.***

Paine	1 bar
Alkulämpötila	25 °C
Laserin jännite	2 V
Laserin sähkövirta	0-40 A
Laserpulssin pituus	0.1 s
Aallonpituus	808 nm
Laserpulssin teho	0-1.38 W
Laserin tarvitsema sähköteho	0-80 W
Laserpulssin halkaisija	0.8 mm
Aktiivihiilen (hiilimustan) raekoko	149 mikrometriä
Magnesiumin raekoko	63-841 mikrometriä
Teflonin raekoko	9-12 mikrometriä
Alumiinin raekoko	1-220 mikrometriä

Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien raekoko on suhteellisen pieni, eli materiaalit ovat hienoa pulveria. Tutkimustilan lämpötila on oletettu olevan jatkuvasti 25 °C.

### 3.2 Syttymisviiveen mittaustilanne

Syttymisviivettä parhaalle seossuhteelle tarkasteltiin oskilloskoopin avulla säteilyn määrää mittaamalla. Seos laitettiin näyteastiaan ja sytytettiin laserilla, jonka jälkeen oskilloskoopilta tarkastettiin säteilyn määrän muutos. Laitteisto on havainnollistettu Kuvassa 18.



*Kuva 18. Syttymisviiveen mittaustilanne.[2]*

### 3.3 Syttymisen ja välittymisen mallintaminen

Tässä osassa kerrotaan lasersytyttimen välittymisenergian ja adiabaattisen reaktiolämpötilan mallista, sekä mallin arvioiman välittymiseen tarvittavan aloitussytytysmassan minimimassan etsimisestä.

#### 3.3.1 Yleistä

Malli on tehty käyttäen Excel-laskentatyökalua. Mallin avulla pystytään arvioimaan eri magnesium/Teflon/hiilimusta-seossuhteille magnesium/Teflon-reaktion adiabaattinen



palamislämpötila, reaktion vapauttama energia ja energiatiheys. Hiilimustan aiheuttama absorption lisäys on otettu mallissa huomioon. Mallin avulla saa selville deflagraation välittymisen RDX-pellettiin ja pienimmän tarvittavan magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksen massan, jolla deflagraation välittyminen tapahtuu. Tuloksiksi saadaan myös magnesium/Teflon-seoksen syttymiseen tarvittava laserpulssin teho, energia ja energiatiheys, sekä laserin sähköteho ja virta. Lisäksi malli arvioi, että riittääkö reaktiosta vapautuva energiatiheys ja adiabaattinen palamislämpötila sytyttämään RDX-pelletin.

Mallissa on käytetty oletuksena, että seos on sekoitettu tasaisesti ja reaktio tapahtuu kaikkialla seoksessa samanaikaisesti. Malli olettaa, että reaktiosta vapautuva energia vapautuu tasaisesti 8 mm korkeudeltaan ja 6 mm halkaisijaltaan olevan sylinterin pinnalta ja tilavuus pysyy vakiona. Oletuksena on, että ainoa reaktio on kaavan 2.8 mukainen, eli ei muita palamistuotteita ja, että hiilimusta ei reagoi reaktion aikana vaan toimii ainoastaan absorptiota lisäävänä tekijänä. Paineen ei oleteta muuttuvan Mg/Teflon-reaktion aikana ja reagoimaton Teflon tai magnesium ei absorboi energiaa. Mallissa partikkelikoon vaikutusta ei ole otettu huomioon.

### 3.3.2 Malli

Mallinnus aloitetaan selvittämällä Mg/Teflonin palamisreaktiosta vapautuva entalpia, joka on 1438 kJ/mol. Reaktioyhtälö on esitetty kappaleessa 2.5.1. Hiilimustan ei oleteta reagoivan magnesiumin ja Teflonin reaktiossa. Kullekin molekyylille määritetään moolimassa kirjallisuudesta. Seuraavaksi määritetään muuttujat, seoksen massa, ja seossuhteet, joiden avulla saadaan selville kunkin aineen moolimäärä. Kaava moolimäärän laskemiseen:

$$n = \frac{\%_{osuus} * m_{total}}{100 * M} \quad (7.1)$$

Kaavassa 7.1 M on kunkin molekyylin moolimassa,  $m_{total}$  on seoksen massa ja  $\%_{osuus}$  on prosenttiosuus kullekin molekyylille.

Moolimäärien avulla voidaan laskea reaktiossa vapautunut energian määrä, joka saadaan kertomalla rajoittavan molekyylin moolimäärä (n) reaktio-entalpialla ( $\Delta H_r$ ). Mallissa on otettu huomioon rajoittavan tekijän valinta Excelin IF-komennolla. Kaava energiamäärän selvittämiseen:

$$h_{total} = n * \Delta H_r \quad (7.2)$$

Seuraavaksi selvitetään kunkin molekyylin massa ennen Mg/Teflon reaktiota, tämä saadaan kertomalla moolimäärä moolimassalla tai vaihtoehtoisesti kertomalla seoksen massa kunkin molekyylin prosenttiosuudella. Tässä mallissa on massa (m) laskettu kertomalla moolimäärä (n) moolimassalla (M):

$$m = M * n \quad (7.3)$$

Kun kunkin molekyylin massa on selvitetty, on selvitettävä Teflonin alkuaineiden massa ennen reaktiota. Teflonin kemiallinen kaava on  $C_2F_4$  eli 2 hiiliatomia ja 4 fluoriatomia. Sen avulla voidaan selvittää kunkin alkuaineen osuus Teflonissa. Alkuaineen osuus saadaan selville kertomalla atomien lukumäärä moolimassalla ja jakamalla se Teflonin moolimassalla. Esimerkki hiilelle:

$$\%_{osuus} = \frac{2 * 12.01 * 100}{100.02} \quad (7.4)$$

Kaavassa 7.4 luku 2 kertoo Teflonissa olevan hiilen atomien lukumäärän. Luku 12.01 on hiilen moolimassa ja 100.02 on Teflonin moolimassa. Lukua 100 käytetään kertoimenä prosenteiksi muutettaessa.

Kun Teflonissa olevien alkuaineiden osuudet on laskettu, voidaan laskea kunkin alkuaineen massa Teflonissa kertomalla alkuaineen prosenttiosuus ( $\%_{osuus}$ ) Teflonin massalla ( $m_{Teflon}$ ):

$$m = \%_{osuus} * m_{Teflon} \quad (7.5)$$

Kun kaikkien ennen Mg/Teflon-reaktiota olevien molekyylien massat on selvitetty, voidaan selvittää reaktion jälkeiset massat ja moolimäärät kullekin molekyylille. Massojen laskennassa on otettu huomioon reagoineet ja reagoimattomat molekyylit. Esimerkiksi magnesiumfluoridin ( $MgF_2$ ) laskemisessa on käytetty IF-komentoa selvittämään, kumpi on rajoittava tekijä reaktiossa - magnesium vai Teflon. Tämän jälkeen on kerrottu rajoittavan tekijän moolimäärällä kunkin alkuaineen moolimassa. Reaktion jälkeisen hiilen massa on laskettu summaamalla alussa lisätty hiili ja Teflonissa oleva hiili ottaen huomioon rajoittavan tekijän määräämä moolimäärä. Seuraavaksi lasketaan reaktion jälkeiset massat reagoimattomalle Teflonille ja magnesiumille. Kaavat ovat molemmille samantyyppiset eli ensin selvitetään rajoittava tekijä, jonka jälkeen selvitetään reagoineen aineen moolimäärä ja lasketaan jäljelle jäänyt moolimäärä. Jäljelle jäänyt moolimäärä kerrotaan moolimassalla reagoimattoman massan selvittämiseksi. Reaktion jälkeiset massat voidaan laskea kaavalla 7.3.

Moolimäärä kullekin reaktion jälkeiselle molekyylille saadaan jakamalla molekyylin massa moolimassalla:

$$n = \frac{m}{M} \quad (7.6)$$

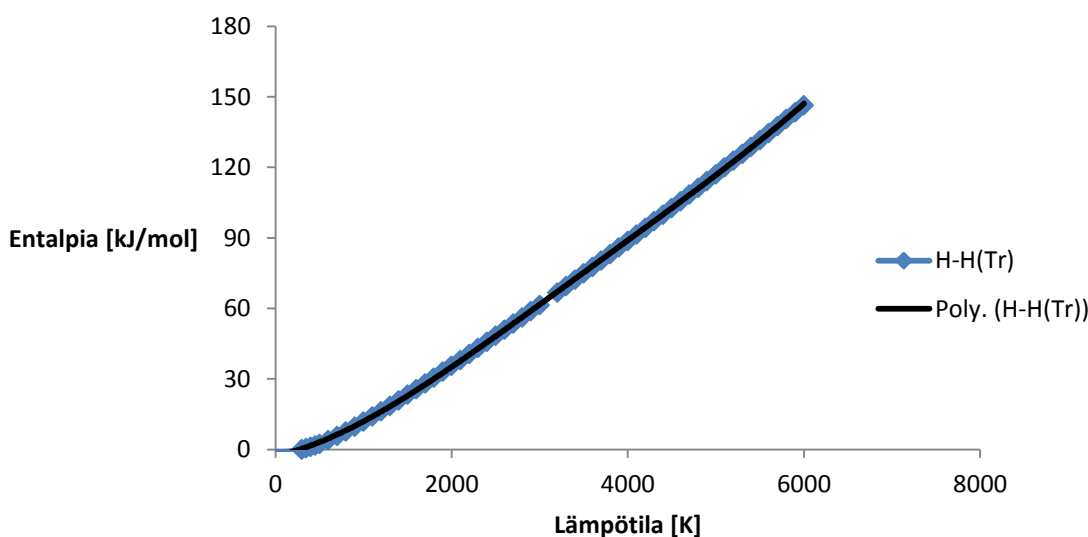
Mooliosuus kullekin reaktion jälkeiselle molekyylille saadaan jakamalla molekyylin moolimäärä kokonaismoolimäärällä ( $n_{total}$ ).

$$mol_{osuus} = \frac{n}{n_{total}} \quad (7.7)$$

Seuraavaksi selvitetään adiabaattinen loppulämpötila reaktiolle. Loppulämpötilan selvittämiseksi on tehtävä kullekin reaktion jälkeiselle molekyylille entalpiapolynomisovite. Entalpiapolynomisovite tehdään kirjallisuustietojen avulla [34-37]. Esimerkkinä hiilen ominaisentalpian muutos lämpötilan funktiona Kuvassa 19. Polynomisovite hiilelle saadaan suuntaviivan y avulla:

$$y = 9.94E - 14x^4 - 1.43E - 09x^3 + 7.82E - 06x^2 + 8.26E - 03x - 2.80 \quad (7.8)$$

Kaavassa 7.8 x on lämpötila kelvineinä. Sovitteiden avulla lasketaan kunkin molekyylin ominaisentalpia lämpötilan funktiona.



**Kuva 19. Hiilen entalpian muutos lämpötilan funktiona.**

Kun kullekin molekyylille on laskettu ominaisentalpia, lasketaan reaktion lopputuotteille yhteisentalpia kaavan 2.6 mukaan.

Nyt saadun yhteisentalpian ja reaktioentalpian tulisi olla yhtä suuria. Mikäli näin ei ole, tulee lämpötilaa muuttaa, jolloin yhteisentalpia muuttuu siten, että energiat täsmäävät. Mallissa tämä on toteutettu käyttäen GoalSeek-toimintoa ja tekemällä toiminnosta makro, joka on määritetty ”Entalpian kautta adiabaattinen lämpötila”-painikkeelle. GoalSeek toiminto muuttaa loppulämpötilaa siten, että erotus kahden energian välillä muuttuisi nolaksi, kaava 2.7.

Kun lopputuotteiden yhteisentalpia ja reaktioentalpia ovat yhtä suuret on löydetty adiabaattinen loppulämpötila reaktiolle.

Lopputuotteiden yhteisentalpian avulla voidaan laskea kokonaisenergiatiheys ( $U_{total}$ ), joka tarkoittaa 8 mm paksuisen ja 6 mm halkaisijaltaan olevan sylinterin kaikilta pinnoilta tasaisesti leviävän energian tiheyttä (A) ( $J/cm^2$ ). Tätä kokonaisenergiatiheyttä

tarvitaan arvioimaan riittääkö reaktion luovuttama energia sytyttämään RDX-pelletin. Kaava kokonaisenergiatiheyden laskentaan:

$$U_{total} = \frac{h_{total}}{A} \quad (7.9)$$

Reaktion adiabaattista lämpötilaa ja RDX:n syttymislämpötilaa [2] voidaan myös verrata keskenään sekä RDX:n syttymiseen tarvittavaa energiaa [2] ja Mg/Teflon-reaktion luovuttamaa energiaa. Oletetaan että RDX:n syttymisen vaatima minimienergia on Harkoman [2] ilmoittama 197.066 J/mol. Malliin on myös lisätty IF-komentoja, jotka ilmoittavat suoraan riittääkö adiabaattinen reaktiolämpötila ja energiatiheys sytyttämään RDX-pelletin. Malli antaa vastaukseksi reaktiolämpötilan ja energiatiheyden riittävyys joko ”Kyllä” tai ”Ei”.

Malliin on lisätty myös makro, joka pitää sisällään GoalSeek-toiminnon. Sillä etsitään minimimassa Mg/Teflon seokselle, joka riittää sytyttämään RDX-pelletin. Makro on määritetty ”Seoksen minimimassan etsiminen tästä napista” painikkeelle. Makro iteroi seoksen massan määrää, joka muuttaa reaktioentalpiaa ja siten energiatiheyttä ( $U_{total}$ ) niin kauan, että tarvittava RDX:n vaatiman syttymisenergiatiheyden ja lopullisen Mg/Teflon-reaktiosta saatavan energiatiheyden erotus on nolla:

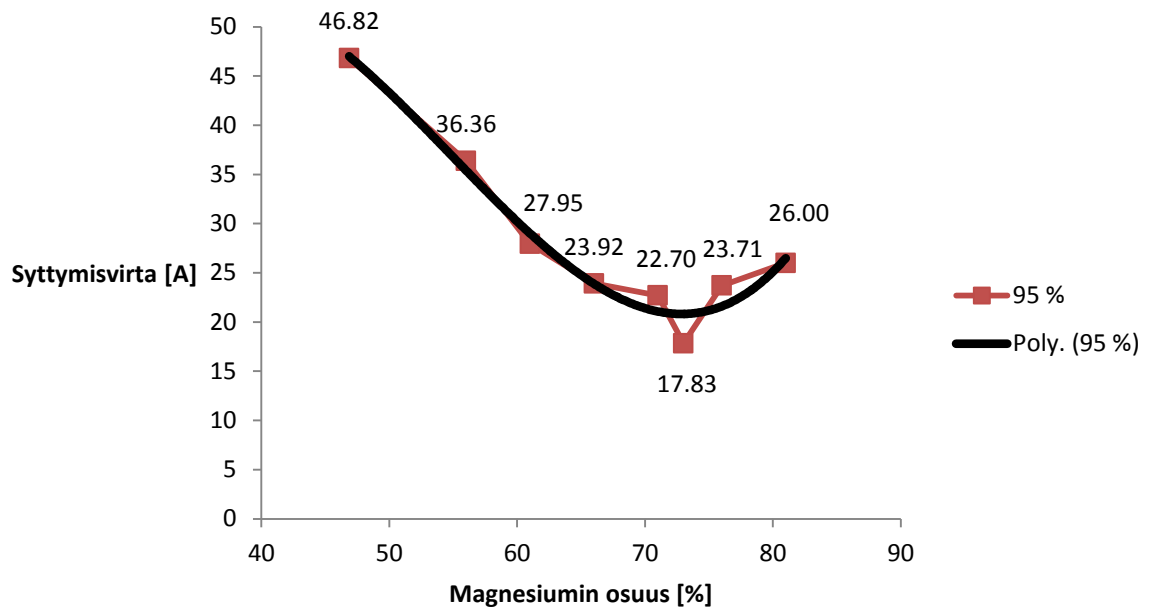
$$U_{RDX} - U_{total} = 0 \quad (7.10)$$

Malli antaa myös magnesium/Teflon-reaktion aloittamiseen tarkoitetulle laserille huippusähkötehon, virran, laserpulssin energian, laserpulssin tehon ja laserpulssin energiatiheyden 95% syttymistodennäköisyydellä. Tarvittava laserin virta on saatu tekemällä polynomisovite Kappaleesta 3.1 saaduista tuloksista, jossa eri magnesium/Teflon/hiilimusta-seossuhteille on kokeellisesti ja tilastollisesti etsitty syttymisvirran arvot, jotka ovat esitettynä Kuvassa 20. Laserin virran avulla saadaan selville huippusähköteho, laserpulssin energia, laserpulssin teho ja laserpulssin energiatiheys.

Kuvan 20 kokeellisille syttymisvirranarvoille on saatu polynomisovite:

$$y = 1.38E - 03x^3 - 0.227x^2 + 11.1x - 116.59 \quad (7.11)$$

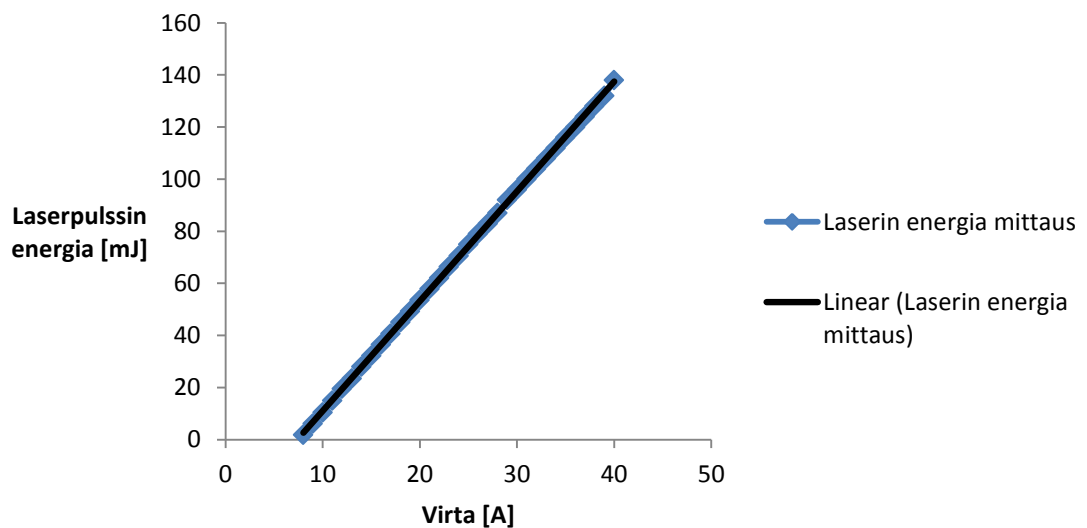
Kaavassa 7.11 x on magnesiumin määrä massaprosentteina seoksessa. Sovite antaa syttymisvirran arvon magnesiumin osuuden funktiona. Sovitteeseen on lisätty myös hiilen vaikutus syttymisvirtaan.



**Kuva 20. Sovite Mg/Teflon- reaktion syttymisvirralle 95% syttymistodennäköisyydellä.**

Seuraavaksi on haettu laserpulssin energia tekemällä polynomisovite saadun virran funktiona Kappaleesta 3.1 saaduilla tiedoilla. Kuvassa 21 on esitetty laserpulssin energian ja virran suhde sekä polynomisovite Kaavassa 7.12:

$$y = 4.21x - 30.98 \quad (7.12)$$



**Kuva 21. Laserpulssin energian polynomisovite virran funktiona.**

Kaavassa 7.12  $x$  on virran arvo ampeereina. Sovite antaa laserpulssin energian määrän virran funktiona.

Seuraavaksi on laskettu laserpulssin teho kertomalla laserpulssin energia pulssin pituudella. Laitteen huippusähköteho (P) saadaan kertomalla syttymisvirta (I) laserlaitteen jännitteellä (U).

$$P = I * U \quad (7.13)$$

Laitteen pulssienergia taas on laskettu kertomalla syttymisvirta, pulssin pituus (sekunteina) ja laitteen jännite keskenään.

$$E_{Pulssi} = I * U * l_{Pulssi} \quad (7.14)$$

Lopuksi lasketaan vielä laserpulssin keskimääräinen energiatiheys jakamalla laserpulssin energia lasersytytyksessä käytetyn kuidun pinta-alalla.

$$U_{Laser} = \frac{E_{Pulssi}}{A_{Kuitu}} \quad (7.15)$$

Mallin käyttöä helpottamaan on luotu Käyttäjä-sivu, Kuva 22, jossa käyttäjän tarvitsee ainoastaan syöttää haluamansa seossuhde, alkulämpötila ja seoksen massa. Käyttäjä-sivulla on myös tarvittavat painikkeet makrojen aktivoimiseksi sekä osio, johon tulokset ilmestyvät. Sivulta löytyvät käyttöohjeet on lisätty helpottamaan tietokonemallin käyttöä.

Muuttujat			
	Seossuhde		Alkulämpötila 298.15 K
Mg	73 %		
Teflon	27 %	Seoksen massa	0.15 g
C	0.5 %		

Lämpötilan ja energian etsiminen tästä napista

Seoksen minimimassan etsiminen tästä napista

**Ohjeet**

1. Anna magnesiumille ja Teflonille seossuhteet, ja lisää hiilimustan osuus
2. Muuta tarvittaessa alkulämpötilaa ja anna seokselle massa
3. Paina "Lämpötilan ja energian etsiminen tästä napista"-painiketta
4. Tulokset ilmestyvät Tulokset-osioon
5. Tarkasta että Virheet laatikossa on pelkkiä nollia, mikäli näin ei ole aloita uudelleen kohdasta 3.
6. Mikäli haluat selvittää minimimassan seokselle jolla RDX-pelletti syttyy niin paina "Seoksen minimimassan etsiminen tästä napista"-painiketta

Tulokset			
<b>Laserin tiedot 95% syttymistodennäköisyydellä</b>			
Virta	17.96 A		
Laserpulssin energia	44.648 mJ		
Pulssin pituus	0.1 s		
Laserpulssin teho	0.4465 W		
Jännite	2 V		
Laitteen sähköteho	35.92 W		
Laitteen pulssienergia	3.592 J		
Laserpulssin energiatiheys	8.8825 J/cm <sup>2</sup>		
		Energiatiheys	2049.1 J/cm <sup>2</sup>
		Kokonaisenergiatiheys	279.42 J/cm <sup>2</sup>
		RDX:n vaatima energiatiheys	67 J/cm <sup>2</sup>
		RDX:n syttymislämpötila	217 °C
		Adiabaattinen Mg/Teflon reaktion lämpötila	1229 °C
		Adiabaattinen Mg/Teflon reaktion lämpötila	1502.1 K
		RDX:n vaatima energia	197.07 J/mol
		Mg/Teflon reaktion energia	579.36 J
Riittääkö reaktiolämpötila sytyttämään RDX:n:	Kyllä		
Riittääkö energiatiheys sytyttämään RDX:n:	Kyllä		

Kuva 22. Käyttäjä-sivu.

### 3.4 Sytytinkuori-prototyypin suunnittelu

Sytyttimen suunnittelu aloitettiin hakemalla rajoittavia tekijöitä sytyttimen mitoille ja muodoille. Muoto sytyttimelle valittiin standardin mukaisen Suomen Puolustusvoimien yleisesti käyttämän sytyttimen mukaan. Se on 60 mm pitkä ja 7.5 mm halkaisijaltaan oleva sylinteri. Sylinteri on tehtävä kahdesta osasta, jotta sisälle saataisiin RDX-pellettejä 5 kappaletta (2 mm korkea ja 6 mm halkaisijaltaan per pelletti) ja 7 mm pituudeltaan ja 6 mm halkaisijaltaan olevaan sylinteriin mahtuva määrä magnesium/Teflon/hiilimusta-seosta suhteella 73/27/+0.5 %. Tämän lisäksi tulisi olla tila 1 mm paksuiselle kvartsilasille. Tilavaatimus kvartsilasille, RDX:lle ja magnesium/Teflon/hiilimustalle olisi 18 mm korkea ja 6 mm halkaisijaltaan oleva sylinteri. Sytyttimeen on myös tehtävä väylä 1 mm paksulle optiselle kuidulle ja kuidulle on suunniteltava liitin, jotta kuitu pysyy paikoillaan. Tällaisen sytyttimen on myös oltava kestävä, jotta se ei hajoaisi kasattaessa tai käsiteltäessä. Sytytin ei saa myöskään olla liian kestävä, vaan sen on kyettävä särkymään sytytettäessä siirtäen räjähdysaineen energian eteenpäin ja täten sytyttämään itse primääriräjähdysaine. Sytytin tulee olla mahdollista kasata helposti sekä kasaamisen tulee onnistua mahdollisimman vähillä työvaiheilla ja työkaluilla. Sytyttimen kuorirakenteen valmistaminen tulee olla mahdollista suorittaa 3D-tulostimella.

Vaatimukset:

- 60 mm pitkä
- 7.5 mm ulkohalkaisijaltaan
- 6 mm halkaisijaltaan oleva sylinteri mahtuu kuoren sisälle
- Tilaa 18 mm pitkälle sylinterille
- Reitti ja liitin optiselle kuidulle
- Helppo kasata
- Kestävä
- Helppo valmistaa
- Mahdollista valmistaa 3D-tulostimella

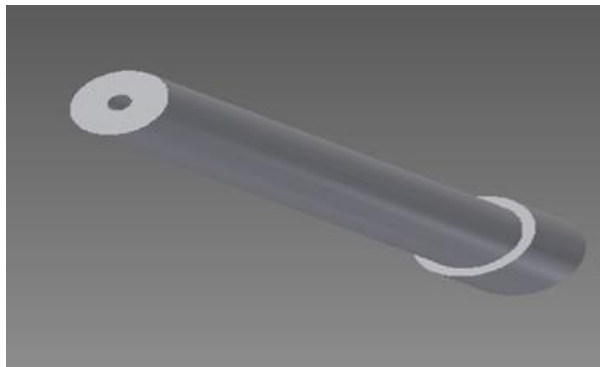
Kuorirakenteesta tehtiin useita malleja AutoDesk Inventorin avulla, joista ainoastaan yksi selviytyi kaikista annetuista vaatimuksista. Muut malleista eivät täyttäneet joko helpon kasattavuuden tai kestävyysvaatimusta. Kuvassa 23 on havainnollistettu muutamia 3D-tulostettuja hylättyjä malleja tai mallin osia.



***Kuva 23. Erilaisia mahdollisia malleja sytyttimen kuorirakenteelle.***

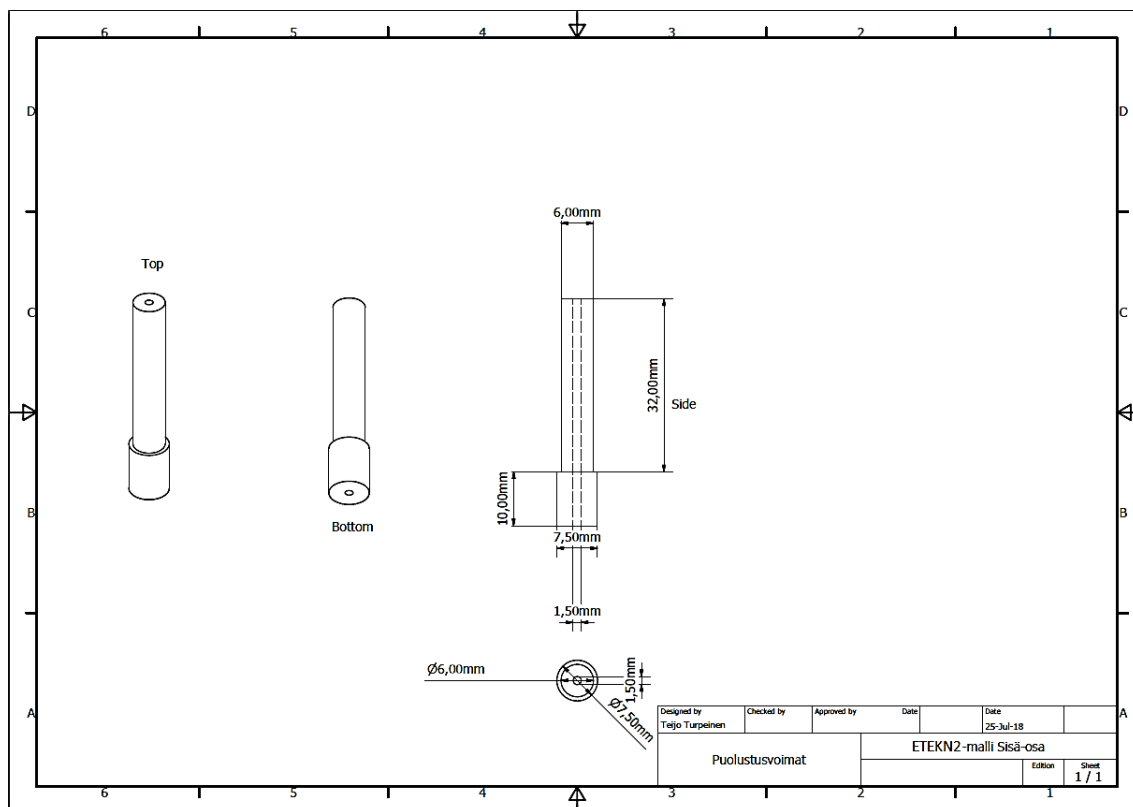
Esimerkiksi Kuvan 23 kolme vasemmanpuolimmaista mallia hylättiin liian pieninä ja hankalina käsitellä.

Valittu kuorirakenne nimettiin ETEKN2-malliksi ja jaettiin kahteen osaan, ulko-osaan ja sisä-osaan, Kuvat 24-27.



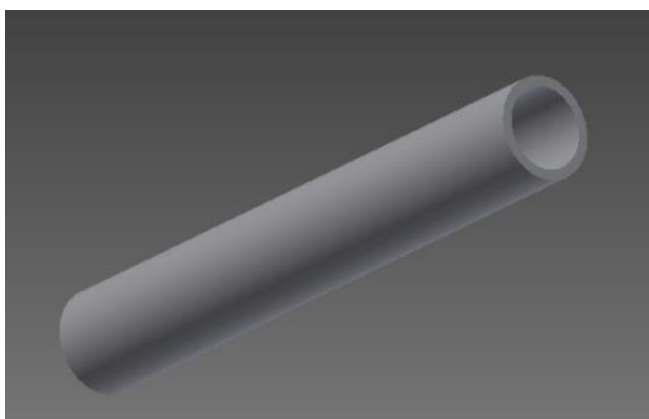
***Kuva 24. ETEKN2-mallisen sytyttimen sisä-osa jossa reitti optiselle kuidulle.***



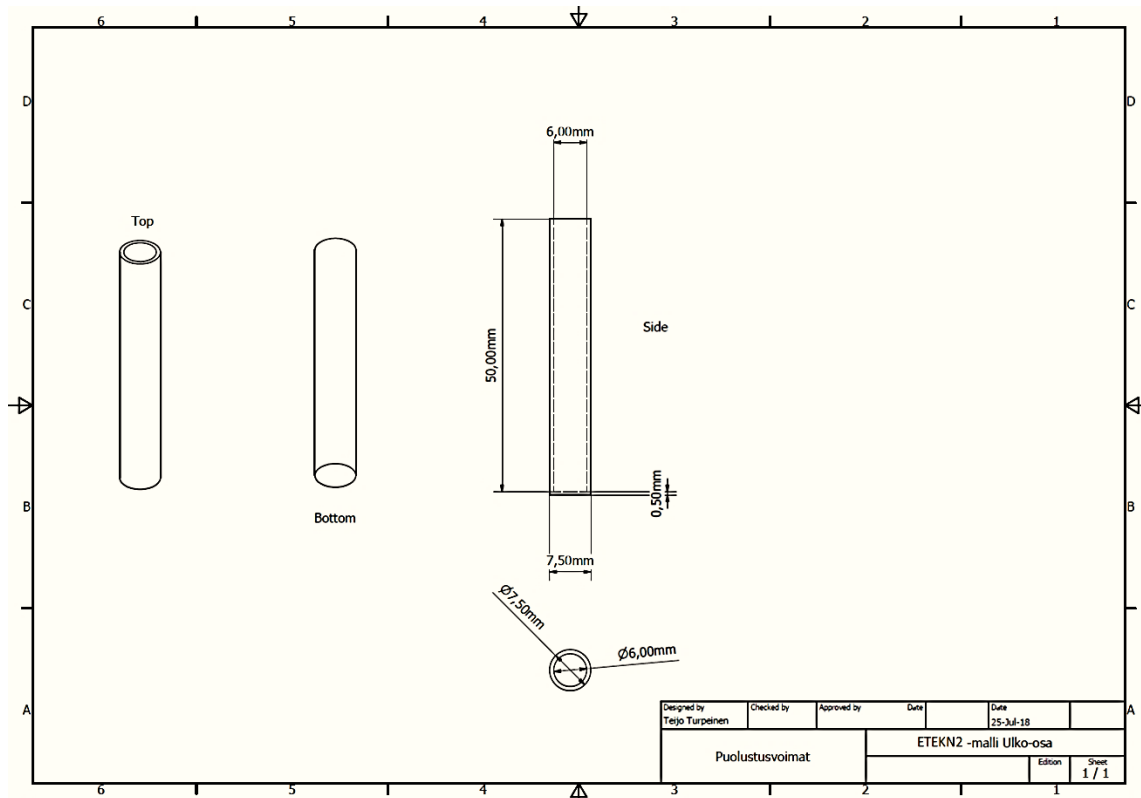


**Kuva 25. ETEKN2-mallin sisä-osan mitat.**

Ulko-osan kuori on tarkoituksella ohut, jotta RDX-räjähteen räjähdysenergia vapautuisi pohjan ja ulko-kuoren ala-osan kautta itse primääriräjähteeseen tehokkaasti. Samasta syystä sytyttimen sisä-osa on paksu ja jäykkä jotta räjähdysenergia ei pääsisi purkautumaan väärään suuntaan. Sisä-osassa on myös paksumpi osa (7.5 mm halkaisijaltaan), jonka tarkoituksena on pysäyttää ulko-osa sopivalle etäisyydelle sytytintä kasattaessa. Kuorirakenne 3D-tulostettiin käyttäen miniFactory 3 tulostinta. Materiaalina tulostuksessa käytettiin polylaktidia (PLA), joka on biohajoava muovi.



**Kuva 26. ETEKN2-mallisen sytyttimen ulko-osa.**



**Kuva 27. ETEKN2-mallin ulko-osan mitat.**

Tulostetut sytyttimen kuori-osat on esitetty Kuvassa 28. Tässä vaiheessa mallissa ei ole kuituliitaintää, ainoastaan reikä sisä-osan keskellä, josta kuitu työnnetään sisään. 3D-tulostaminen vei aikaa noin yhden tunnin yhdelle ETEKN2-mallin prototyypille.



**Kuva 28. ETEKN2-mallin 3D-tulostettu versio.**

### 3.5 Prototyypin testaus

Valmistetulle prototyypille tehtiin sarja koesytytyksiä, joissa testattiin rakenteen sopivuutta magnesium/Teflon/hiilimusta-reaktion välittymisestä RDX-pellettiin. Koesytytykset aloitettiin kasaamalla sytyttimen ulko-osan sisälle 5 kappaletta RDX-pellettejä sekä kaatamalla magnesium/Teflon jauhetta pellettien päälle. Jauheen päälle asetettiin kvartsilasi ja sytytin suljettiin painamalla sisäosa ulko-osan sisään, Kuvat 29-31.



*Kuva 29. Sytyttimen ulko-osa, 5 RDX-pellettiä, magnesium/Teflon/hiilimusta jauhetta, kvartsilasi, sytyttimen sisä-osa ja optinen kuitu kasaamistilanteessa.*



*Kuva 30. Sytytin puoliväliin asti painettuna.*



*Kuva 31. Valmis kasattu sytytin.*

Seuraavaksi sytyttimeen liitettiin optinen kuitu sisä-osassa olevan väylän kautta kvartsilasiin saakka. Kuitu kiinnitettiin teipillä, Kuva 32. Valmis sytytin asennettiin sen jälkeen räjäytysputkeen ja suljettiin kannella. Optista kuitua pitkin ammuttiin laserpulssi Tutcore A200 diodilaserilla.



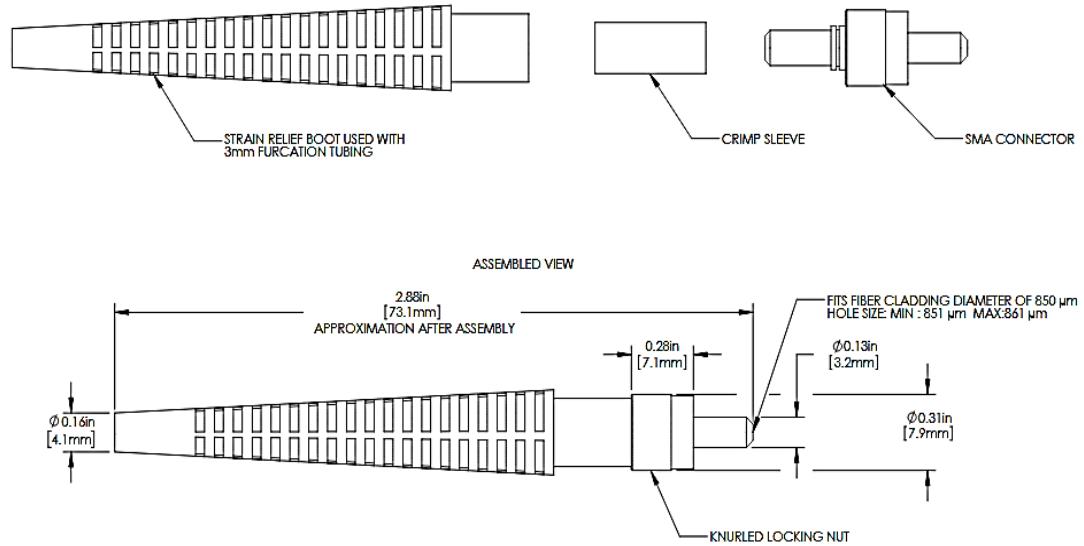
*Kuva 32. Sytytin testitilanteessa. Koska sytyttimessä ei tässä vaiheessa ollut kuituliitintä on kuitu kiinnitetty teipillä.*

### 3.6 Prototyypin kuituliitäntä

Käyttömukavuuden ja käytännöllisyyden takia lasersytyttimen kuori täytyy olla hyvin kiinnitetty laserin kuituun, joten kuoreen täytyy suunnitella liitinosa. TutCore A 200 diodilaserissa on kuituliittimenä 1/4"-36 UNS-2B kierreillä toimiva SMA 905 urosliitin, joten liitäntä kuoreen saadaan aikaiseksi tekemällä sopivat kierreet (1/4"-36 UNS-2A) ETEKN2-mallin sisä-osaan. Kuvissa 33 ja 34 on esitetty SMA 905 urosliitin.



*Kuva 33. SMA 905 urosliitin. [38]*



**Kuva 34. SMA 905 urosliittimen räjäytyskuva ja mitat. [38]**

Alkuperäisessä ETEKN2-mallin sisä-osassa paksuus liitäntäpäässä on 7.5 mm, joten tätä osaa täytyy kaventaa 6.35 millimetriin ja 7.5 mm osaa siirtää kesemmälle. Kierteiden pituudeksi riittää 10 mm. SMA 905 liittimessä on ulkoneva osa jonka halkaisija on 3.2 mm ja pituus 6.4 mm. Tämän ulkonevan osan takia on ETEKN2-mallin sisä-osaan tehtävä halkaisijaltaan 3.5 mm ja 20 mm pituudeltaan oleva suurempi reikä. Koska 7.5 mm aluetta joudutaan siirtämään 10 mm kesemmälle niin ETEKN2-mallin ulko-osaakin on muokattava. Ulko-osan pituutta lyhennetään 10 millimetriä, osan muuten jäädessä samanmuotoiseksi.

## 4. TULOKSET

Tässä osiossa käydään läpi syttymiskokeiden tulokset ja syttymis- ja välittymismallista saadut tulokset. Sytyttimen kuorirakenteen lujuuslaskennat ja lopullinen muoto kuvataan myös tässä osiossa.

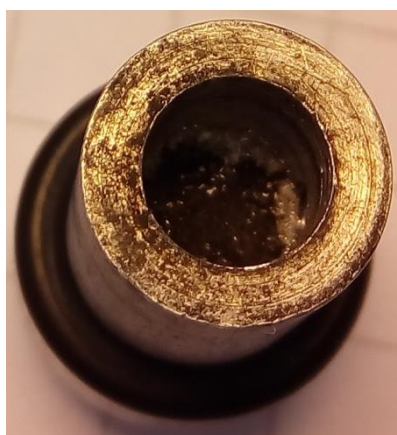
### 4.1 Syttymiskokeiden tulokset

Testit aloitettiin hakemalla puristamattomalle magnesiumin ja Teflonin seokselle alhaisin syttymisteho diodilaserilla laserin sähkövirtaa muuttaen. Sähkövirran muuttamimen muuttaa laserpulssin tehoa. Raekokoja ei muutettu yhdellekään ainesosalle. Taulukossa 4 on esitetty mittaustuloksista lasketut syttymistodennäköisyydet 50% ja 95% todennäköisyyksillä, painoarvo mittaustuloksissa oli 95% syttymistodennäköisyydellä. Vasemmalla pystyrivillä on ilmoitettu magnesiumin massaprosentti seoksessa tarkoittaen, että loput seoksesta on Teflonia. Toinen pystyrivi ilmoittaa syttymisvirran määrän 50% syttymistodennäköisyydellä ja kolmas pystyrivi taas syttymisvirran 95% syttymistodennäköisyydellä.

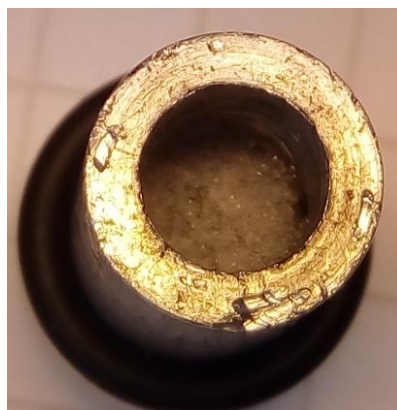
*Taulukko 4. Magnesium/Teflon seoksen syttymisvirrat.*

Mg %	Virta [A] 50%	Virta [A] 95%	Huomioita
32.7	26.087	29.578	Virheellistä*
46.85	29.647	46.823	-
56	26.244	36.356	-
61	24.640	27.947	-
66	21.965	23.920	-
71	20.318	22.696	-
73	15.000	17.831	-
76	17.137	23.714	-
81	21.999	25.997	-

(\*)32.7 % magnesiumin osuudella saadut tulokset ovat tilastollisesti virheellisiä johtuen siitä, että 30:stä tehdystä testistä vain 2 syttyi ja ne sattuivat syttymään 25.5 ja 26 ampeerissa, tästä voidaan päätellä että 32.7% seossuhde ei syty kyseisellä laserin sähkövirralla. Viimeisin sähkövirran arvo kyseiselle seossuhteelle oli 37.5 ampeeria. Tällä arvolla syttymistä ei tapahtunut, vaikkakin pientä palorintaman muodostumista havaittiin koko välillä 25-37,5. Palorintama ei levinnyt ympäröivään materiaaliin aiheuttaen täydellistä syttymistä. Kuvassa 35 ja Kuvassa 38 on esimerkkeinä osittain palaneet näytteet, josta nähdään, että palorintama ei ole kunnolla edennyt ja saanut aikaan täydellistä palamista vaan suuri osa seoksesta on jäänyt reagoimatta. Vertailun vuoksi Kuvassa 36 on kokonaan syttymätön testinäyte ja Kuvassa 37 täydellisesti syttynyt testinäyte.



***Kuva 35. Osittain syttynyt testinäyte.***



***Kuva 36. Syttymätön testinäyte***



***Kuva 37. Syttynyt testinäyte.***

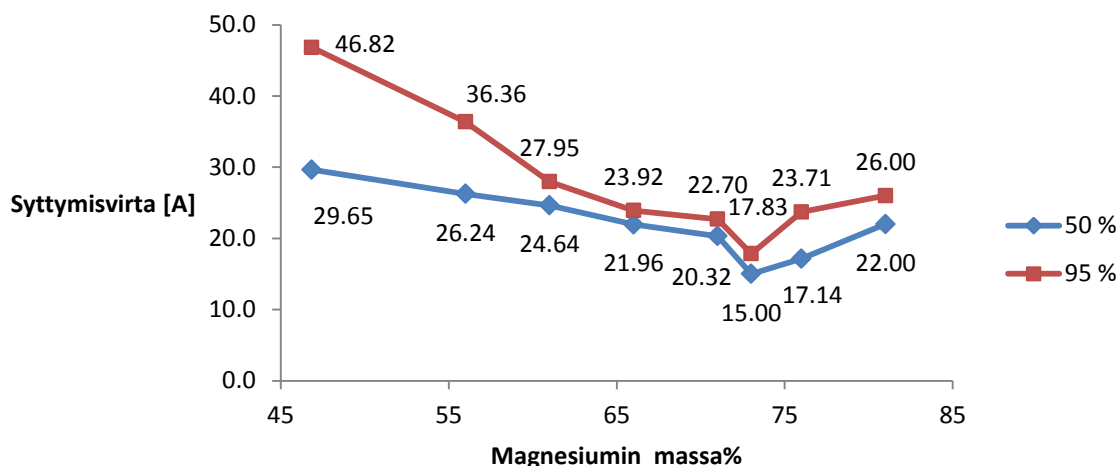


***Kuva 38. Esimerkki kokeesta, jossa palorintama ei etene pelletissä.***

Taulukon 4 tietojen avulla on muodostettu Kuva 39, josta on jätetty pois seossuhde 32.7%. Kuvasta 39 on helppo nähdä alin syttymisvirran arvo, joka on 17.83 A (vastaava laserpulssin energia on 44.1 mJ ja teho 0.44 W sekä laitteen huippusähköteho 35.66W ja laitteen pulssienergia 3.57 J) ja sitä vastaava seossuhde 73% magnesiumia ja 27% Teflonia normaalissa tiheydessä ilman pelletiksi puristamista. 17.83 ampeeria vastaa  $8.8 \text{ J/cm}^2$  energiatihelyttä. Vertailutulokseksi voidaan ottaa Menichellin [39] YAG-laserilla tehdyt tutkimukset Mg/Teflon seoksen syttymiselle, jonka energiatihelydeksi on saatu  $11.32 \text{ J/cm}^2$ . Menichellin tutkimuksiin verrattuna voisi päätellä, että diodilaser soveltuisi paremmin Mg-Teflon seoksen sytyttämiseen kuin YAG-laser.

Kuvan avulla myös nähdään, että 95% syttymistodennäköisyyttä vastaava syttymisvirran arvo saavuttaa minimin kohdassa 17.83 A. Käytettyä seossuhdetta voidaan siten pitää optimaalisena.

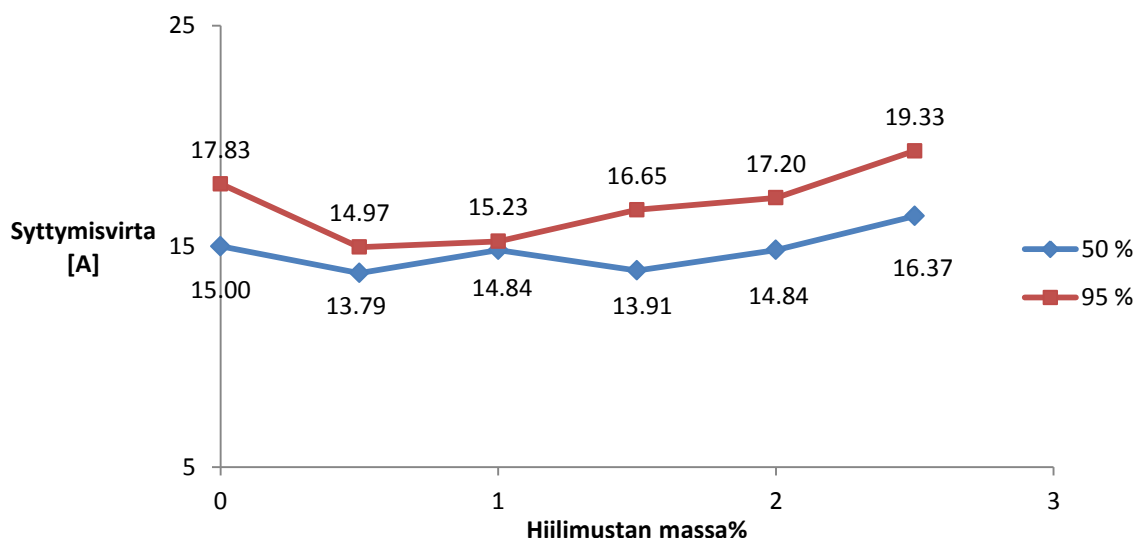




**Kuva 39 . Syttymisvirta esitettyinä magnesiumin ja Teflonin eri seossuhteilla.**

Seuraavaksi tehtiin vastaavat testaukset alumiinin ja Teflonin seoksille, puristamatta sitä pelletiksi. Alumiinille tehtiin testit suhteilla 26.5/73.5%, 46.85/53.15%, 56/44%, 61/39% ja 66/34%, ensimmäisen prosenttiosuuden kertoessa alumiinin massaosuuden seoksessa. Kyseisissä testeissä näytteitä saatiin syttymään ainoastaan seoksella 61/39%. Syttymisvirraksi saatiin tällöin 50% syttymistodennäköisyydellä 37.5 ampeeria (vastaava laserpulssin energia on 126.93 mJ, laserpulssin teho 1.27 W, laitteen huippusähköteho 75 W ja laitteen pulssienergia 7.5 J) ja 95%:lle 41.5 ampeeria (vastaava laserpulssin energia on 143.78 mJ, laserpulssin teho on 1.44 W, laitteen huippusähköteho 83 W ja laitteen pulssienergia 8.3 J). Muut alumiinin ja Teflonin seokset eivät syttyneet laserin maksimivirroilla, joka on 40 ampeeria. Näin ollen alumiinin ja Teflonin seokset karsiutuivat pois seuraavasta vaiheesta, jossa seoksiin lisättiin hiilimustaa absorptioita parantamiseksi.

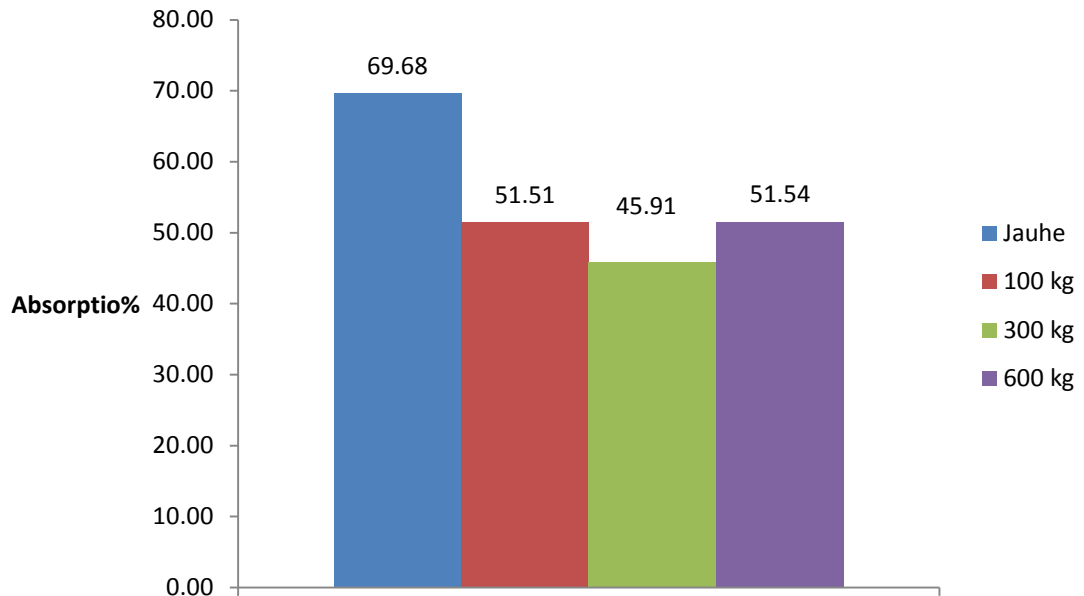
Seuraavaan vaiheeseen valittiin magnesiumin ja Teflonin seossuhde 73/27% (massaprosenttia), joka antoi alimman syttymisvirran (17.83 A) 95% syttymistodennäköisyydellä. Valittuun seokseen lisättiin aktiivihiiltä eli hiilimustaa, 0.5%, 1%, 1.5% , 2% ja 2.5% (massaprosenttia) seoksen kokonaismäärästä siten, että seossuhde 73/27% säilyy. Hiilimusta ei osallistu magnesiumin ja Teflonin reaktioon, vaan toimii ainoastaan absorptiota lisäävänä tekijänä. Tulokset ovat ilmaistuna Kuvassa 40, josta nähdään että alin syttymisvirran arvo on 14.968 ampeeria (vastaava laserpulssin energia on 32.05 mJ, laserpulssin teho on 0.32 W, laitteen huippusähköteho 30 W ja laitteen pulssienergia 3 J) 95% syttymistodennäköisyydellä ja vastaa hiilimustan 0.5 massaprosentin lisäystä seokseen. Tulosten perusteella valitaan seossuhde 73/27/+0.5% ja siten päästään seuraavaan vaiheeseen, jossa tarkastellaan tiheyden vaikutusta syttymisvirtaan.



**Kuva 40. Hiilimustan lisäämisen vaikutus 73/27% magnesiumin ja Teflonin seoksen syttymiseen.**

Valitun seossuhteen tiheyttä muutettiin puristamalla se pelletiksi eri voimilla. Pelletin koko on paksuudeltaan noin 2 mm ja halkaisijaltaan 6 mm. Jauheena seos painaa  $0.602 \text{ g/cm}^3$ . Puristusvoimiksi valittiin 600 kg (tiheys  $2.375 \text{ g/cm}^3$ ) ja 100 kg (tiheys  $1.572 \text{ g/cm}^3$ ). Alle 100 kilogramman puristuksella seos ei pysynyt pellettinä, joten tämän pienempiä puristusvoimia ei käytetty. Yhdelläkään pelletiksi puristetulla seoksella ei saatu aikaan syttymistä edes laserin suurimmalla sähkövirralla 40 A (vastaava laserpulssin energia on 137.46 mJ, laserpulssin teho on 1.37 W, laitteen huippusähköteho 80 W ja laitteen pulssienergia 8 J), joten parhaimmaksi tiheydeksi saatiin puristamaton jauhe  $0.602 \text{ g/cm}^3$ , jota vastaava syttymisvirta on aiemmin mainittu 14.968 ampeeria. Kuvasta 38 näkee hyvin kuinka palorintama jää paikalliseksi pisteeksi eikä laajene koko pelletin alueelle. Vaikkakin Kuvan 38 reaktio on ollut niin kiivas, että se on mustannut ja hieman sulattanut pelletissä kiinni olleen kvartsilasin, ei tulosta voida tulkita syttymiseksi. Oletettavasti pelletiksi puristaminen estää magnesium ja Teflon partikkeleiden vapaan kontaktin keskenään ja näin ollen pysäyttää palorintaman laajenemisen.

Tiheyden lisäksi mitattiin absorptio jauheelle, kyseisille 100 kg:n ja 600 kg:n pelleteille, sekä 300 kg:n puristusvoimalla tehdyille pelletille. Laserpulssin absorptio pelleteille on ilmaistu Diagrammissa 1.



**Diagrammi 1. Laserpulssin absorptio magnesium/Teflon/hiilimusta -jauheessa, sekä 100 kg:n, 300 kg:n ja 600 kg:n puristusvoimalla tehdyissä pelleteissä.**

Diagrammista 1 nähdään että jauheella on suurin absorptio, noin 70%, ja 300 kg:n puristusvoimalla tehdyssä pelletissä pienin, noin 46%. 100 kg:n ja 600 kg:n puristusvoimilla tehdyillä pelleteillä on sama absorptioprocentti, 51.5%. Absorptiotutkimuksen tulos tukee aiemmin tehtyjen tiheystutkimusten tulosta, jonka perusteella tiheyden lisääminen heikentää syttymistä. Tuloksesta voidaan päätellä että pelletiksi puristaminen heikentää materiaalin absorptiota.

Absorptiomittauksissa käytetyt pelletit on esitetty Kuvassa 41 ja 42. Kuvasta 41 nähdään, että suuremmilla puristusvoimilla tehdyt pelletit ovat tummempia, jonka tulisi lisätä materiaalin absorptiota.



**Kuva 41. 100, 300 ja 600 kg:n puristusvoimilla tehdyt pelletit.**

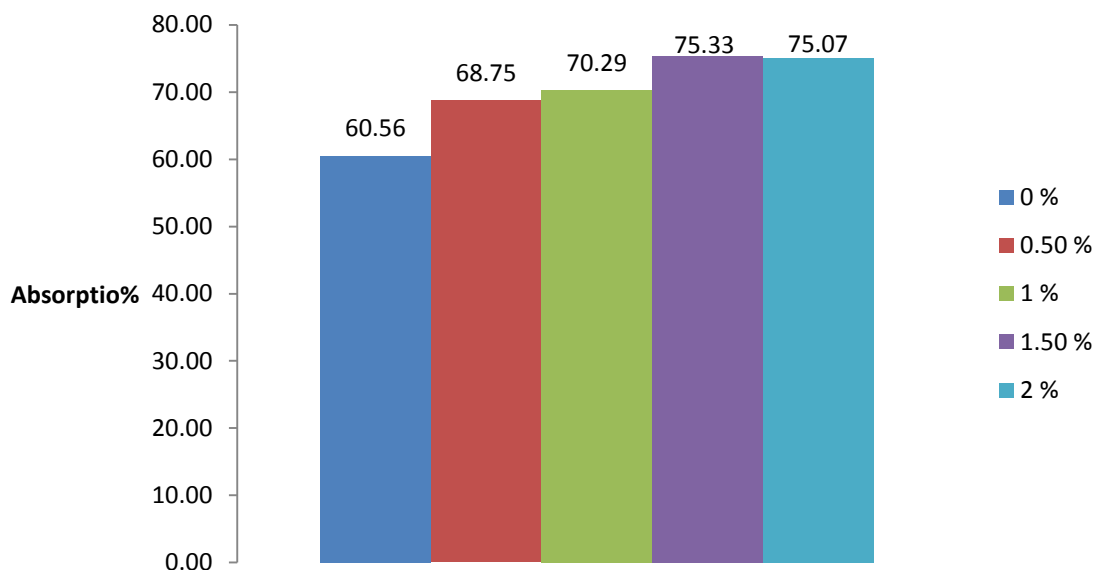
Kuvasta 42 nähdään, että suuremmilla puristusvoimilla tehdyt pelletit ovat pinnaltaan kiiltäviä. Tämä tulos on samansuuntainen Skocypecin [10] tutkimuksen kanssa, jonka mukaan puristaminen aiheuttaa heijastumista materiaalin pinnasta. Heijastuminen taas vähentää absorptiota.



***Kuva 42. Pellettien pinnan kiiltävyys.***

Absorptiomittauksien tuloksista ja Kuvien 41 ja 42 perusteella voidaan päätellä, että vaikka suuremmilla puristusvoimilla tehdyt pelletit ovatkin pinnaltaan tummemmat niin pellettien pinnan kiiltävyys aiheuttaa lasersäteen heijastumista materiaalista poispäin niin paljon että absorptioprocentti laskee verrattuna puristamattomaan seokseen. Pellettien ulkonäkö myös selittää miksi 600 kg:n puristusvoimalla tehdyn pelletin absorptio on hieman suurempi kuin 300 kg:n puristusvoimalla tehdyn pelletin. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että yli 300 kg:n puristusvoimalla tehdyn pelletin tummuminen on suurempaa, kuin pinnan heijastuksen lisääntyminen, puristuksen kasvaessa.

Absorptiotutkimuksia jatkettiin mittaamalla hiilimustan vaikutus absorptioon, hiilimustan 0%, 0.5%, 1%, 1.5% ja 2% määrillä. Seoksia ei puristettu pelleteiksi vaan niiden annettiin olla jauheena. Magnesiumin ja Teflonin seossuhteena oli kussakin seoksessa 73/27 massaprosenttia. Absorptiomittaukset tehtiin mittaamalla 45 asteen kulmassa näytteestä heijastunut laserpulssin energia ja vertaamalla tulosta kiiltävään alumiinipeltiin kohdistetun laserpulssin heijastumisenergiaan. Diagrammissa 2 on esitetty absorptioprocentti kullekin hiilimustan määrälle.



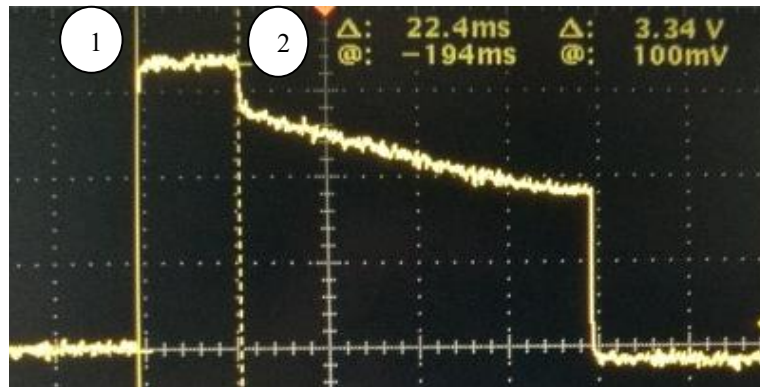
**Diagrammi 2. Hiilimustan vaikutus absorptioon hiilimustan 0%, 0.5%, 1%, 1.5% ja 2% määrillä. Magnesiumin ja Teflonin seossuhteena oli kussakin seoksessa 73/27 massaprosenttia.**

Pelkälle magnesiumin ja Teflonin seokselle saatiin absorptioksi 60.6% ja 0.5% hiilimustan lisäykselle 68.8%, joka eroaa alle prosenttiyksikön tiheysmittauksissa saadulle tulokselle, johtuen eri virran suuruuksilla tehdyistä testeistä. Tuloksista nähdään, että absorptio kasvu vähenee ja lopulta lakkaa suuremmilla hiilimustan määrillä (1.5% ja 2% tuloksia voidaan pitää identtisinä). Tästä voidaan päätellä, että hiilimustan lisäyksellä on ainakin lokaalimaksimi, jossa absorptio ei enää kasva. Tulokset tukevat aiemmin tehtyjen kokeiden tuloksia, jossa tutkittiin hiilimustan lisäyksen vaikutusta seoksen syttymiseen ja todettiin hiilimustan helpottavan seoksen syttymistä. Vaikkakin absorptiotutkimuksen perusteella yli 0.5% hiilimustan osuudella olevat seokset absorboivat enemmän laservaloa niin hiilimustan lisäyksen tutkimisessä löydetty 0.5% hiilimustan määrä syttyy pienemmällä laserin teholla kuin seokset joissa on enemmän hiilimustaa. Tämä johtunee siitä, että hiilimusta suuremmilla määrillä estää magnesium ja Teflon partikkeleiden keskinäisen kanssakäymisen. Tulokset ovat samansuuntaiset Kochin [22] kirjassaan esittämien tulosten kanssa.

Parhaalle seossuhteelle tehtiin myös 5 kappaletta syttymistestejä 50 bar paineisella synteettisellä ilmalla, jotta nähtäisiin sulkeman vaikutus syttymiseen. Painetestien perusteella alhaisin syttymisvirta olisi 18 A, joka on suurempi kuin 1 bar paineessa noin 15 A. Mittausepätaarkkuus ja suhteellisen alhainen otanta huomioiden paineella ei näyttäisi olevan syttymisvirtaa alentavaa vaikutusta, vaan sen vaikutus olisi näiden mittausten perusteella päinvastainen. Tämä tulos poikkeaa Harkoman [2] tutkimuksissa RDX:lle saaduista tuloksista. RDX on energoittava materiaali, jossa spontaani reaktio lähtee liikkeelle suhteellisen herkästi, lisäksi reaktion lopputuotteet ovat suurimmaksi osaksi kaasuja lisäten paikallisesti syttymiskohdan painetta ja sulkemaa. RDX:n reaktio alkaa lasersytytyksessä deflagraationa, joka kiihtyy sulkeman vaikutuksesta

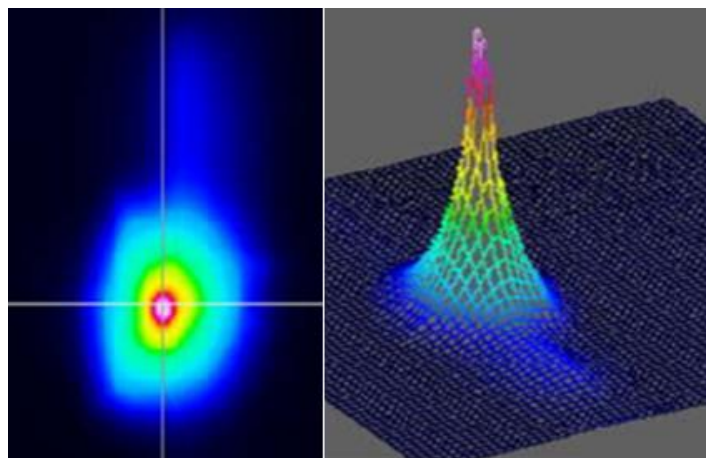
detonaatioksi, kun Mg/Teflon-reaktiossa kyseessä on nopea palaminen (deflagraatio) läpi koko näytteen. Tulosten perusteella magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksen sytyttämiseen tarvittavan energian määrää ei voida sulkemalla vähentää.

Syttymisviiveen mittauksissa tuloksiksi saatiin 20.8, 22.4 ja 17.6 millisekuntia, joiden keskiarvo on 20.27 millisekuntia. Kuvassa 43 on esitetty esimerkkinä tyypillinen parhaalle Mg/Teflon/hiilimusta-seokselle, 15 A:n syttymisvirralla saatu syttymisviiveen mittaustulos, 22.4 ms sytytyspulssin pituuden ollessa 100 ms. Viive saadaan pisteiden 1 ja 2 väliltä eli laserpulssin (1) jälkeen kvartsilasi alkaa tummua Mg/Teflon reaktion seurauksena ja säteilyn määrä alenee (2). Syttymisviiveen kesto on tärkeä tieto lasersytyttimen toimintaa ja käyttöä suunniteltaessa.



**Kuva 43. Tyypillinen 15 ampeerin syttymisvirralla Mg/Teflon seokselle mitattu 22.4 ms syttymisviive.**

Kuvassa 44 on havainnollistettu n. 1 mm etäisyydellä 0,8 mm valokuidusta mitattu Coherent Tutcore A200 diodilaserin säteen profiili. Profiilin avulla voidaan tarkastella laserpulssin käyttäytymistä sytytyskokeissa. Säteen profiilista nähdään että laserpulssin energiatiheys on huipussaan kuidun keskellä ja heikkenee jyrkästi reunoja kohti mentäessä.



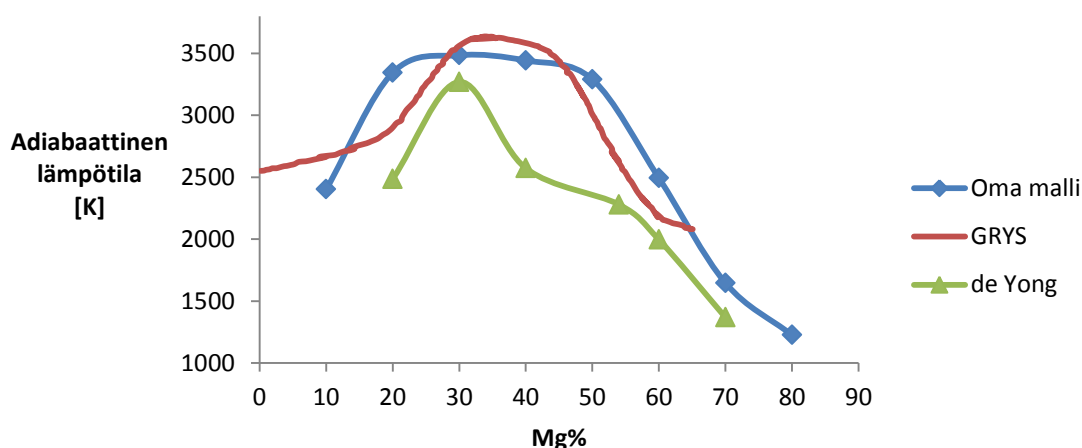
**Kuva 44. Tyypillinen valokuidun päästä mitattu laserpulssin profiili. Kuidun läpimitta on 0.8mm ja etäisyys laserprofilometrin (WinCamD) detektorista 1 mm.**

Lopuksi tehtiin vielä välittymiskoe parhaalla seossuhteella valmistetulla magnesium/Teflon/hiilimusta jauheella 200 kg:n voimalla (tiheys  $1.47 \text{ g/cm}^3$ ) puristettuun RDX-pellettiin, eli testattiin riittääkö magnesiumin ja Teflonin reaktiosta vapautuva energia sytyttämään RDX-pelletin. Välittymiskokeita tehtiin 15 A syttymisvirralla 5 kappaletta, jossa jokaisella kokeella saatiin RDX-pelletti syttymään. Detonaatioon siirtyminen todettiin äänen perusteella ja tarkastelemalla testikappaleita. Välittymiskokeen perusteella voidaan sanoa, että magnesium/Teflon/hiilimusta seos soveltuu lasersytyttimen aloitusyhtymämassaksi.

ETeKN:n tutkimusalalla on tutkittu vertailuna myös tulitikkumassan käyttöä lasersytytyksessä [40]. Tutkimusten perusteella tulitikkumassa tai sen kaltainen pyrotekninen massa sopii paremmin lasersytytysmateriaaliksi kuin magnesium/Teflon/hiilimusta seos, kun kriteerinä pidetään tarvittavaa laserpulsin energiaa, joka on noin puolet magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksen vastaavasta arvosta. Toisaalta turvallisuustekijänä tulitikkumassan hapettimena sisältämä kaliumkloraaatti nostaa sen tahatonta syttymisherkkyyttä merkittävästi verrattuna sinänsä lähes inerttiin magnesium/Teflon/hiilimusta-massaan.

## 4.2 Syttymis- ja välittymismalli

Mallin antamia adiabaattisia loppulämpötiloja verrattiin Grysin [41] käyttämään ZMWNI-mallinnusohjelmaan sekä de Yongin [42] käyttämään NASA-Lewis CEC 76 mallinnusohjelmaan. Grysin malli olettaa reaktiossa syntyvän muitakin lopputuotteita kuin magnesiumfluoridia ja hiiltä. De Yongin malli on tehty käyttäen MTV-seosta, eli lisä-aineena on Vitonia. Vertailu on kuvattuna Kuvassa 45.

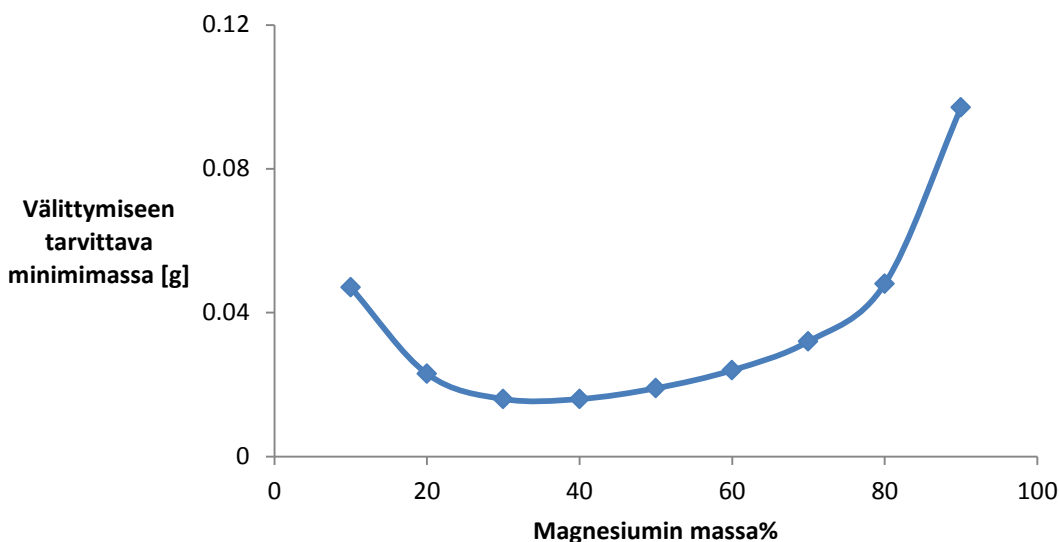


**Kuva 45. Adiabaattisen lämpötilan mallinnuksen vertailu Grysin ja de Yongin käyttämien mallinnusohjelmien antamiin tuloksiin.**

Tulosten perusteella voidaan sanoa että malli kuvaa adiabaattista palamislämpötilaa suhteellisen hyvin ja seuraa Grysin mallia melko tarkasti. Mallin antama

maksimilämpötila, 3505 K, löytyy Mg/Teflon-reaktion stökiometrisestä seossuhteesta (32.7/67.3). Adiabaattinen palamislämpötilan määrä on tärkeä tieto arvioitaessa, että riittääkö Mg/Teflon-reaktion lämpötila sytyttämään RDX-pelletin. Kun adiabaattista lämpötilaa käytetään arvioinnissa on otettava huomioon, että lämpö siirtyy myös ympäristöön. Ympäristöön siirtyvää lämpöä ei voida tällä mallilla arvioida vaan sitä varten tulisi tehdä lisätutkimuksia.

73/27/+0.5 massaprocentin seossuhteella valmistetulle magnesium/Teflon/hiilimusta-seokselle malli antaa minimimassaksi 0.036 grammaa. Tällä massan määrällä deflagraation välittymisen RDX-pellettiin tulisi onnistua, vaikkakaan käytännön testejä kyseisellä massan määrällä ei tehty. Kuvassa 46 on havainnollistettu mallin antama tulos, eri magnesiumin määrillä, deflagraation välittymiseen tarvittavalle minimimassalle jolla RDX-pelletti syttyy.

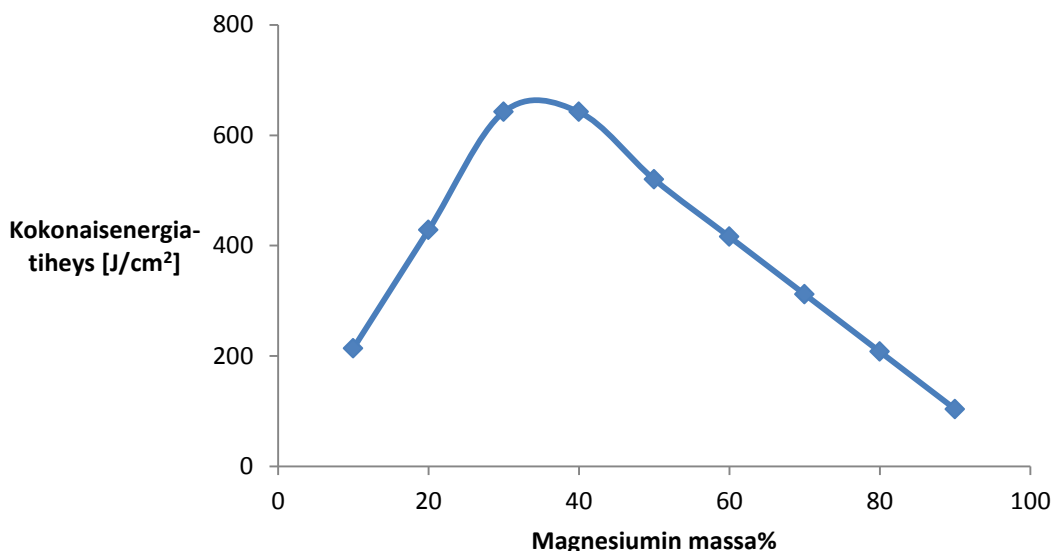


**Kuva 46. Deflagraation välittymiseen tarvittava minimimassa magnesiumin määrän funktiona.**

Kuvasta 46 nähdään, että minimimassa, 0.014 grammaa, löytyy Mg/Teflon-reaktion stökiometrisestä seossuhteesta (32.7/67.3).

Kuvassa 47 on havainnollistettu mallin antama kokonaisenergiatiheys magnesiumin määrän funktiona, massan ollessa 0.15 g. Kokonaisenergiatiheys siis tarkoittaa 8 mm paksuisen ja 6 mm halkaisijaltaan olevan sylinterin kaikilta pinnoilta tasaisesti leviävän energian tiheyttä, joka tarkoittaa magnesium/Teflon/hiilimusta-seokselle varattua tilaa sytyttimessä. Kokonaisenergiatiheydellä pyritään arvioimaan syttyykö RDX-pelletti Mg/Teflon-reaktiosta vapautuvalla energialla.





**Kuva 47. Kokonaisenergiatiheys magnesiumin määrän funktiona.**

Kuvasta 47 nähdään että taaskin stökiometrisellä seossuhteella löydetään suurin arvo,  $699.96 \text{ J/cm}^2$ . Kuvasta nähdään että tutkimuksissa saadun parhaan (73/27%) seossuhteen energiatiheys,  $280.82 \text{ J/cm}^2$ , on hyvin kaukana stökiometrisen seossuhteen energiatiheydestä.

Vaikka stökiometrinen seossuhde antaakin suurimman kokonaisenergiatiheyden, deflagraation välittymiseen tarvittavan minimimassan ja adiabaattisen lämpötilan, niin stökiometrinen seossuhde ei silti ole kaikista paras vaihtoehto, koska se ei syty diodilaserilla laisinkaan. Välittyminen siis tapahtuisi stökiometrisellä suhteella kaikista parhaiten, mutta seoksen sytyttäminen taas tapahtuu parhaiten seossuhteella 73/27/+05%.

Kuvasta 20 nähdään, että mallissa käytetty polynomisovite antaa laserin sähkövirran määrän luotettavasti alle 65 magnesium massaprosentin arvoilla ja melko luotettavasti yli 65 magnesium massaprosentin arvoilla, syttymisvirran maksimivirheen ollessa noin 3 ampeeria suurempi kuin kokeellisissa testeissä saatu tulos, vastaten noin 17 % virhettä. Sähkövirran virhe ilmenee samalla suhteella virheenä myös muissa laserlaitteen tehoissa ja energioissa.

### 4.3 Prototyypin käytännön testien tulokset

Prototyypille tehtiin kolme onnistunutta sytytystä 20 ampeerin virralla (laserpulssin energia 53.6 mJ ja laserpulssin teho 0.536 wattia) ja kahdesti 25 ampeerin virralla (laserpulssin energia 75 mJ ja laserpulssin teho 0.75 wattia). Koesytytyksissä prototyypin ulko-osa tuhoutui täysin tai sitä ei enää löydetty, sisä-osan jäädessä käyttökelpoiseksi. Yksi sytytystestin tulos on esitetty Kuvassa 48.



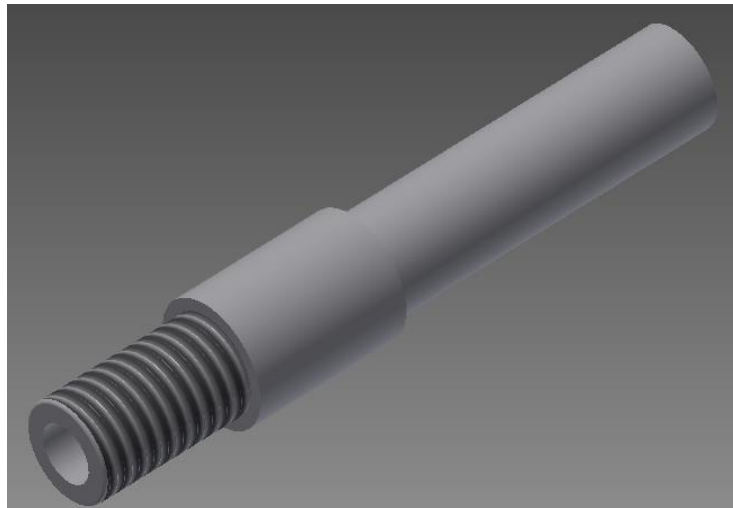
***Kuva 48. Käytetty sytytin ja sen vasemmalla puolella käyttämätön. Sytyttimestä ei ole jäänyt jäljelle kuin sisä-osa. Paperimainen harmaa osa on palanutta teippiä. Sytyttimen ulko-osaa ei löydetty.***

Tulosten perusteella prototyypin muoto ja rakenne soveltuvat magnesium/Teflon/hiilimusta seoksen deflagraation välittymiseen RDX-pelletissä. Optinen kuitu saatiin työnnettyä sytyttimen sisään, kun kuidun väylää sytyttimessä hieman siistittiin. Tulostimen jälki osien pinnalla on muodoltaan rengasmaista ja täten muodostaa osien pinnalle ”haitat” mahdollistaen lukituksen, kun sisä-osa työnnetään ulko-osan sisään. Rengasmaisesta pinnasta johtuen erityistä lukitusmekanismia ei tarvita. Sytyttimen rengasmaisen pinta haittasi hieman kasausta estämällä pellettien ja kvartsilasin asettamista jauheen jäädessä poimuihin kiinni.

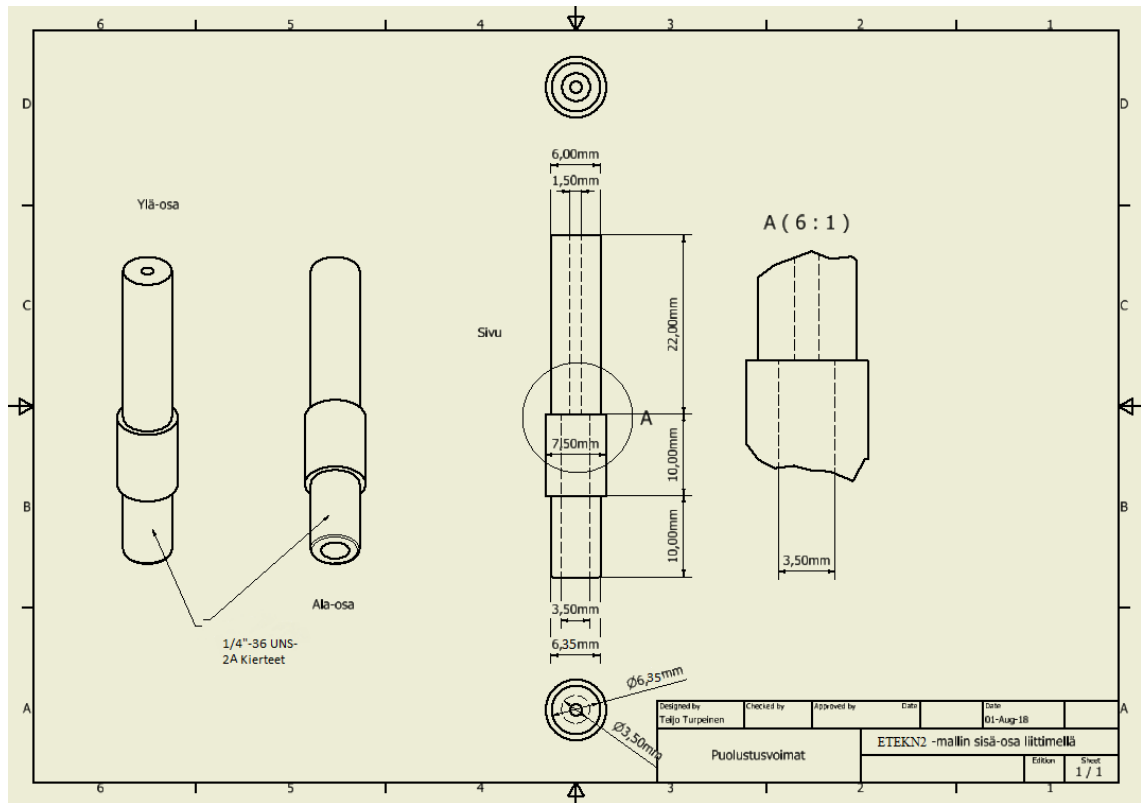
#### **4.4 Lasersytytin ETEKN2**

ETEKN2-malliksi nimetty sytytin perustuu Kappaleen 4.3 prototyyppiin, josta jatkokehitettiin käytännöllisempi kuituliitännällä varustettu ETEKN2-malli.

Kuvissa 49 ja 50 on esitetty lopullisen ETEKN2-mallin sisä-osa kierteineen.

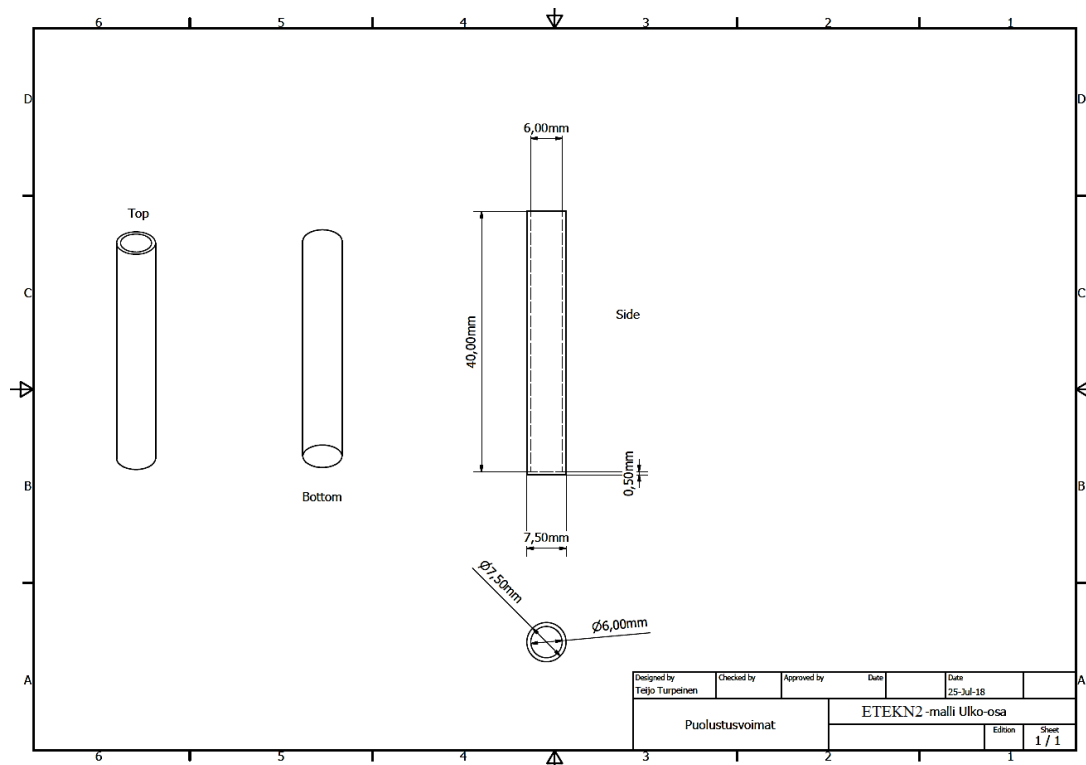


***Kuva 49. Kierteet ETEKN2-mallin sisä-osassa.***



**Kuva 50. Mitat kierteillä varustettuun ETEKN2-mallin sisä-osaan.**

ETEKN2-mallin ulko-osan muotoa ei tarvinnut enää kuituliitännän takia muuttaa vaan osa on esitetty jo Kuvassa 26. Ainoastaan ulko-osan pituutta täytyi lyhentää 10 mm ja lopulliset mitat ovat esitettynä Kuvassa 51. Sytyttimien osien muoto mahdollisti osien helpon valmistamisen 3D-tulostimella ja sytyttimen helpon kasaamisen.



**Kuva 51. Lopulliset mitat ETEKN2-mallin ulko-osaan.**

Kierteillä varustetut osat tulostettiin teräksisinä, alumiinisina ja muovisina 3DSTEP Oy nimiseltä yritykseltä, joka tulosti osat 3D-jauhetulostimilla, Kuva 52. Jauhetulostimilla saadaan tulostettua myös kiertteet. Muoviset sytyttimen osoittautuivat parhaaksi ja halvimmaksi tulostusmateriaaliksi näistä kolmesta vaihtoehdosta. Muoviset osat olivat myös kaikista kevyimpiä.



**Kuva 52. 3D-tulostetut sytyttimen osat liittimellä. Vasemmalla teräksinen, keskellä muovinen ja oikealla alumiininen sytytin.**

Muovinen sytytin kasattiin ja liitettiin optisella kuidulla laserlaitteeseen, Kuva 53, jonka jälkeen suoritettiin sytytystesti. Sytytystesti suoritettiin kullekin kuorimateriaalille Kappaleen 3.5 tehtyjen sytytystestien mukaisesti.



***Kuva 53. Valmis kasattu muovinen sytytin johon on liitetty optinen kuitu.***

Tulosten perusteella kullakin materiaalilla valmistettu sytytin toimii kuten pitääkin ja välittyminen RDX-pellettiin onnistuu. Paine suuntautuu haluttuun suuntaan jättäen ETEKN2-mallin sisä-osan ehjäksi ja hajottaen ulko-osan. Kuvassa 54 on havainnollistettu alumiinisen ja teräksisen sytyttimen jäänteet sytytystestien jäljiltä.



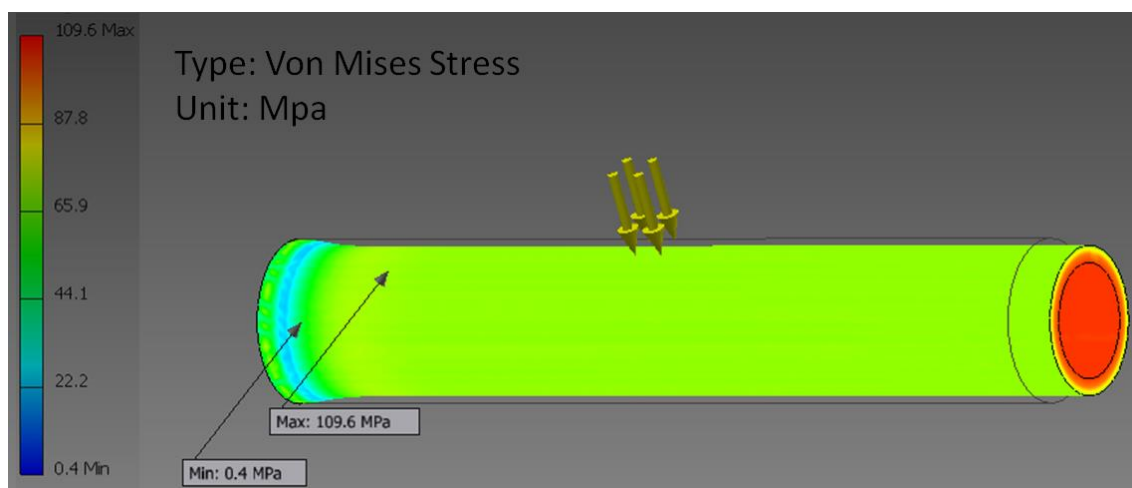
***Kuva 54. Alumiininen (vasemmalla) ja teräksinen sytytin sytytystestin jälkeen. Paine suuntautui haluttuun suuntaan.***

Kuvasta 54 nähdään että alumiinisen sytyttimen ulko-osa on hajonnut sirpaleiksi, kun taas teräksisen sytyttimen ulko-osasta on irronnut pohja, jota pitkin räjähdyspaine on päässyt purkautumaan. Tuloksen perusteella teräksistä sytytintä tulisi käyttää mikäli räjähdyspaine sytyttimestä halutaan suuntautuvan pelkästään aksiaaliseen suuntaan. Alumiininen ja muovinen sytytin soveltuvat kohteisiin jossa räjähdyspaine saa suuntautua aksiaaliseen suunnan lisäksi myös muihin suuntiin. Muovisen sytyttimen ulko-osaa ei löydetty tarkasteltavaksi, mutta sytyttimen sisä-osa jäi ehjäksi.

## 4.5 ETEKN2-mallin lujuuslaskennan tulokset

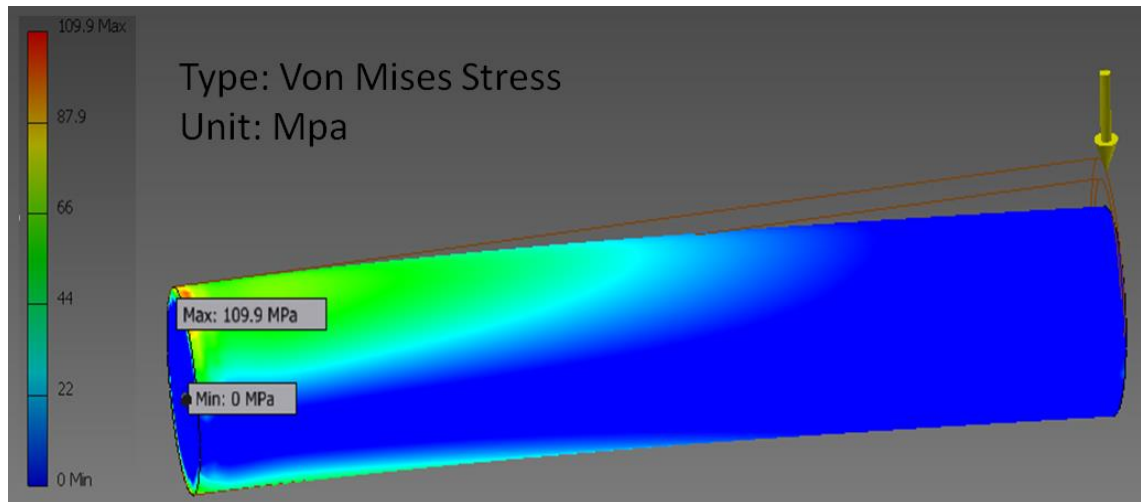
ETEKN2-malliselle liittimellä varustetulle sytytinprototyypille tehtiin lujuuslaskennat Autodesk Inventorin avulla. Kappaleet testattiin tasaisesti sisäänpäin kohdistuvaa puristavaa voimaa ja taivutusvoimaa vastaan. Nämä voimat valittiin koska ne ovat tyypilliset kappaleisiin kohdistuvat voimat kasaamis- ja käyttötilanteissa. Lujuuslaskennassa käytetty keskimääräinen laskentaelementin koko on 0.02 mm ja grading factor 10.

Ensiksi testattiin mallin ulko-osan puristuksen kestäminen. Puristus kohdistuu tasaisesti koko ulko-osan ulkokuorelle sisäänpäin kohdistuneena, Kuva 55. Kappale on kiinnitettynä pohjastaan, vasen pääty kuvassa 55. Iteroimalla haettiin puristusvoimaksi 18.9 MPa (noin 192.7 kg/cm<sup>2</sup>), jolla Von Mises-jännitys (yhdistetty jännitys) on 109.6 MPa. Yhdistetyn jännityksen maksimipiste löytyy sisäpinnalta putken alku-osasta.



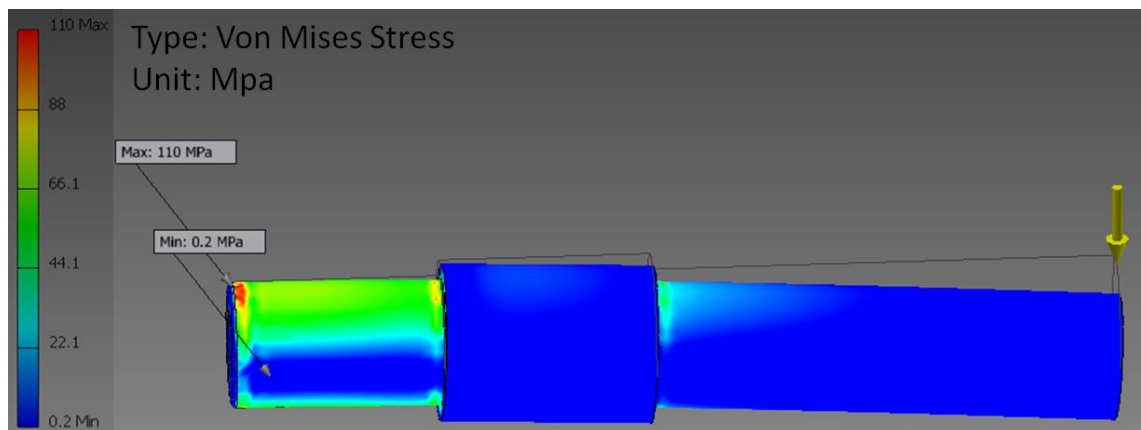
***Kuva 55. Puristuksen aiheuttama Von Mises-jännitys ETEKN2-mallin sytyttimen ulko-osalle.***

Seuraavaksi etsittiin maksimitaivutusvoima ulko-osalle. Taivutus tapahtuu pistekuormituksella ulko-osan äärimmäisestä päästä (keltainen nuoli) toisen päässä ollessa lujasti kiinni. Taivutusvoimaksi saatiin 51.9 N, joka vastaa noin 5.3 kilogramman painoa. Kuvasta 56 näkyy, että yhdistetty jännitys 51.9 Newtonin kuormalla on 109.9 MPa (rajan ollessa 110 MPa). Maksimitaivutusjännityspiste löytyy kappaleen pinnalta alkupäästä läheltä kiinnityskohtaa. Kiinnityskohta on vasen pääty kuvassa 56.

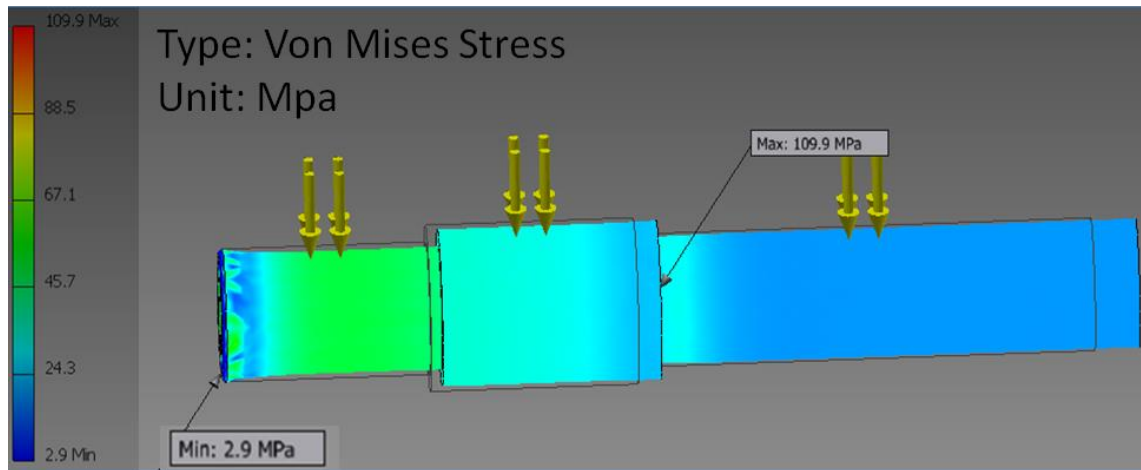


***Kuva 56. Taivutuksen aiheuttama Von Mises-jännitys ulko-osalle.***

Vastaavasti ETEKN2-mallin liittimellä varustetun prototyypin sisä-osalle etsittiin maksimitaivutusvoima ja kohtisuora maksimipuristusvoima. Maksimitaivutusvoimaksi saatiin 39.3 Newtonia joka vastaa 4.01 kilogramman painoa, Kuva 57. Kohtisuoraksi sisäänpäin suuntautuneeksi maksimipuristusvoimaksi saatiin 34.7 MPa ( $353.8 \text{ kg/cm}^2$ ), Kuva 58. Lujuuslaskennan tulokset molemmille osille on koottu taulukkoon 5.



***Kuva 57. Taivutuksen aiheuttama Von Mises-jännitys ETEKN2-mallisen prototyypin sisä-osalle. Kiinnitys vasemmasta päästä.***



**Kuva 58. Von Mises-jännitys ETEKN2-mallin sisä-osalle tasaisella kohtisuoralla puristuksella. Kiinnitys vasemmasta päästä.**

**Taulukko 5. Ulko- ja sisä-osan lujuuslaskennan tulokset.**

	Ulko-osa	Sisä-osa
Taivutusvoima [kg]	5.3	4.01
Kohtisuora puristus [ $\text{kg}/\text{cm}^2$ ]	192.7	353.8

Tulosten ja käytännön kokemusten perusteella voidaan päätellä, että sytytin kestää mahdolliset kasaamisesta ja valmistamisesta johtuvat voimat ja puristukset, vaikkakaan referenssiä suuremman mittaluokan valmistamisessa aiheutuvista voimista ei ole.

## 4.6 Pohdinta ja jatkotoimenpiteet

Saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa että diplomityön tavoitteet on saavutettu ja normaalissa ilmakehän paineessa toimiva lasersytytin on saatu kehitettyä. Pienimmällä diodilaserin teholla syttyvä aloitusytytysmassa löydettiin, vaikka aivan kaikkia seossuhteita ei testattukkaan nyt löydetyn parhaan seossuhteen ympäristössä, josta voisi löytyä pienempiäkin syttymistehon arvoja. Syttymis- ja välittymismalli saatiin rakennettua ja siitä saadut tulokset auttoivat sytyttimen kuorirakenteen suunnittelussa. Tietokonemalli tarjoaa myös tärkeää tietoa itse diodilaserin tehoista ja energioista joita tarvitaan sytyttimien massatuotannossa ja jatkokehittelyssä. Tietokonemallissakin on parantamisen varaa ja sen tarkkuutta voitaisiin lisätä teettämällä lämpöarvo-mittaukset kullekin magnesium/Teflon/hiilimusta-seossuhteelle, jolloin myös reagoimattoman magnesiumin ja Teflonin keräämä lämpöenergia voitaisiin ottaa huomioon. Sytyttimen kuorirakenne kuituliittimineen saatiin suunniteltua, valmistettua ja testattua käytännön



testeissä. Kuorirakenteessa on vielä varaa pienentää sen pituutta aksiaalisessa suunnassa.

Tutkimuksen onnistuminen lisää räjähdysaineiden kanssa työskentelevien ihmisten turvallisuutta, mikäli yleisesti käytössä sähkösytyttimet korvataan lasersytyttimillä. Varsinkin kun aloitusytytymassana käytetty magnesium/Teflon/hiilimusta seos on hyvin epäherkkää energeettistä massaa.

Jatkotutkimuksina voisi olla laserpulssin aallonpituuden vaikutus magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksen sytyttämiseen tarvittavaan lasersytyttimen tehoon. Myös magnesiumin ja alumiinin hapettuneita muotoja ( $\text{MgO}$  ja  $\text{AlO}_3$ ) Teflonin kanssa seostettuna olisi hyvä tutkia syttymisenergian ja reaktioentalpian vuoksi, koska tässä tutkimuksessa käytettyjen aineiden palamisjäännöksiin jää paljon elementaarista hiiltä jonka voisi mahdollisesti hapettaa. Magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksen kuljetus- ja varastointiturvallisuus tulisi myös määrittää, esimerkiksi hankaus- ja iskuherkkyystutkimuksien avulla.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli selvittää pienimmällä diodilaserin teholla syttyvä aloitussytytysmassa lasersytyttimen rakentamista varten. Tarkoituksena oli myös rakentaa syttymis- ja välittymismalli, sekä suunnitella sytyttimen kuorirakenne ja tehdä siihen liittyvät lujuuslaskennat ja käytännön testit.

Saatujen mittaustulosten mukaan magnesiumin ja Teflonin seos on selkeästi paremmin lasersytytykseen soveltuva vaihtoehto kuin alumiinin ja Teflonin seos. Kun kriteerinä pidetään pienintä syttymisvirtaa, parhaaksi seossuhteeksi Mg/Teflon seokselle saatiin 73/27, vaikka stoikiometrinen seossuhde onkin 32.7/67.3 massaprosenttia. Oletettavasti Teflonin kasvanut määrä ei mahdollista tarpeeksi läheistä kanssakäymistä magnesium-partikkeleiden kanssa jotta palorintama etenisi. Tämä pätee myös toisinpäin eli silloin, kun magnesiumia on liikaa, ei synny kanssakäymistä Teflon-partikkeleiden kanssa.

Hiilimustan sopiva lisäys pienentää tarvittavaa syttymisvirran määrää, johtuen absorption kasvamisesta. Testeissä ilmennyt paras hiilimustan osuus on 0.5 massaprosenttia, suurempi määrä heikentää syttymistä johtuen ilmeisesti siitä, että suurina määrinä hiilimusta toimii esteenä magnesium- ja Teflon-partikkeleiden välissä.

Käytettäessä tiheyttä muuttujana yksikään pelletiksi puristettu seos ei syttynyt laserilla, vaan syttymisen kannalta paras tiheys on puristamattoman jauheen tiheys  $0.602 \text{ g/cm}^3$ . Ulkonäöltään magnesium-Teflon pelletti näyttää kiinteältä metallilta, joten ilmeisesti tällainen rakenne estää reaktiorintaman leviämisen. Absorptiotutkimuksissa selvisi, että puristus vähentää materiaalin laserpulssin säteilyn absorptiota ja näin lisää tarvittavan syttymistehon määrää. Kuitenkin 600 kg:n ja 100 kg:n puristuksella tehdyissä pelleteissä oli sama absorptioprosentti, vaikka absorptio heikkeni 300 kg:n puristuksella tehdyssä pelletissä. Eroa selittää pellettien ulkonäön muutos puristuksen lisääntyessä. 600 kg:n puristuksella tehty pelletti oli väriltään tummempi (tummuus lisää absorptiota), mutta pinnaltaan peilimäinen, joka lisää heijastumista. 300 kg:n puristuksella tehty pelletti oli vaaleampi kuin 600 kg:n puristuksella tehty pelletti, mutta myös peilimäinen. Kun taas 100 kg:n puristuksella tehty pelletti oli vaaleampi kuin muut pelletit, mutta vähemmän peilimäinen.

Tutkimuksissa todettiin hiilimustan lisäämisen seokseen nostavan absorption määrää, joka oli odotusarvonakin, mutta suuremmilla hiilimustan määrittämisillä absorptioprosentti ei enää kasva. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että tutkimuksissa löydettiin lokaali absorptiomaksimi alhaisissa hiilimustan määrittämisillä.

Mittaustulosten mukaan sulkeman lisääminen painetta nostamalla ei alenna syttymiseen tarvittavaa energian määrää vaan pikemminkin kasvattaa sitä, huomioon ottaen testien vähäisen määrän aiheuttaman epätarkkuuden. Syttymisviive parhaalle seokselle normaaliassa ilmakehän paineessa on keskiarvoisesti 20.27 millisekuntia.

Välittymiskokeen perusteella magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksella voidaan normaalin ilmakehän paineessa sytyttää RDX-räjähdysaine. Magnesium/Teflon/hiilimusta 73/27/+0.5-massaprosentin seos sytyttää 95% syttymistodennäköisyydellä RDX-räjähdysaineen, kun laserpulssin teho 0.32 wattia, jolloin teholähteen hetkellinen teho on tällöin 30 W. Täten on löydetty lasersytytykseen sopiva aloitusytytysmassa, jolla saadaan RDX-pelletti syttymään normaalissa ilmakehän paineessa suhteellisen pienellä laserin teholla. Tutkimuksissa löydetty seos ei kuitenkaan lasersytytyksessä syty yhtä herkästi kuin ETEKN:n tutkimusalalla tutkittu tulitikkumassa, mutta tutkimuksissa löydetty seos on turvallisempi kuin tulitikkumassa.

Syttymis- ja välittymismalli antaa suhteellisen tarkat arvot laserilta vaadittaville tehoille, energioille ja virroille. Esimerkiksi mallissa seossuhteella 73/27/+0.5% saatu arvo poikkeaa vain noin 3 ampeeria (vastaten noin 17 %) kokeellisesta tuloksesta. Tämä johtuu mallissa olevasta Mg/Teflon sovitteesta, joka ei kykene seuraamaan kokeellisia tuloksia riittävän tarkasti, kuten Kuvasta 20 näkyy. Muilla seossuhteilla malli on tarkempi ja voidaan olettaa, että tuo 3 ampeerin poikkeama on maksimi.

Mg/Teflon-reaktiossa vapautuneen energian määrä on vain laskennallinen, koska asiasta ei ole kokeellisia tuloksia joihin verrata, mutta tuloksia voidaan pitää suhteellisen tarkkoina. Kirjallisuuslähteistä saadut entalpian arvot ottavat huomioon molekyylien sulamisen vain magnesiumin tapauksessa, kun taas magnesiumfluoridin ja hiilen tapauksessa molekyylien oletetaan pysyvän kiinteinä. Teflonin entalpian arvot löytyivät kirjallisuudesta ainoastaan kaasumaisessa muodossa. Oletettavasti molekyylien entalpian arvot voivat muuttua paljonkin eri olomuodoissa, joten mallin tarkkuus heikkenee johtuen puuttuvista tiedoista.

Tietokonemallilla voidaan täten suhteellisen tarkasti arvioida eri magnesium/Teflon/hiilimusta-seossuhteille magnesium/Teflon-reaktion aiheuttama energian vapautuminen ympäristöön sekä adiabaattinen palamislämpötila. Adiabaattisen palamislämpötilan ero Grysin ja de Yongin malleista johtunee mallinuksissa käytetyistä erilaisista alku- ja lopputuotteista. Myös välittyminen RDX-pellettiin voidaan arvioida suhteellisen tarkasti.

ETEKN2-sytytinmalli voidaan valmistaa ja kasata helposti sekä tulostaa 3D-tulostimella, kuten kaikki sytyttimen osat, joita on testeissä käytetty. Kasaamisen ja valmistuksen tulisi täten onnistua myös suuremmassa mittakaavassa (suuremmilla kappalemäärillä). 3D-tulostimella aikaansaatu prototyypin rengasmaisen pinta osoittautui eduksi ulko-osan ja sisä-osan toisiinsa lukitsemisen kannalta, mutta haitaksi

kasaamistilanteessa pellettien, jauheen ja kvartsilasin ottaessa kiinni rengasmaiseen pintaan. Kasaamistilanteessa ilmennyt haitta ei kuitenkaan ollut kovin suuri. Jauhetulostimella tuotetussa kappaleessa taasen pinta on sileää ja täten ulko- ja sisä-osan kiinnitys toisiinsa täytyy varmistaa liimaamalla.

Koesytytysten perusteella Kappaleessa 4.4 kehitetty sytyttimen rakenne on sopiva syttymisen välittymiseen magnesium/Teflon/hiilimusta-seoksesta RDX-pellettiin. Sytytyksissä prototyypin ulko-osan tuhoutuminen tai häviäminen, sisä-osan jäädessä ehjäksi, viittaa siihen että räjähdysenergia on suuntautunut haluttuun suuntaan.

Inventorilla tehdyn lujuuslaskennan perusteella osat kestävät hyvin puristusta kohtisuoraan, mutta taivutusta heikosti. Taivuskestävyyden heikkous johtunee kappaleiden materiaalista ja muodosta, koska molemmat kappaleet ovat halkaisijaansa nähden pitkiä. Sisä-osan heikompi suoriutuminen taivutusvoiman lujuuslaskennassa ulko-osaan verrattuna johtunee sisä-osan pienemmästä halkaisijasta, vaikka voisi kuvitella, että ulko-osa onttona sylinterinä kestäisi vähemmän taivutusta. Täytyy myös ottaa huomioon, että käyttämämme 3D-tulostin ei tuota yhtenäistä sileäpintaista jälkeä vaan kerroksittaista ja rengasmaista. Tämä saattaa aiheuttaa heikkoja kohtia kappaleisiin ja täten heikentää lujuutta. Jauhetulostimella tuotetun kappaleen pinta on sileää ja täten tulostusjäljen aiheuttamia heikkoja kohtia ei esiinny yhtä paljon.

Työn kokonaistavoite saavutettiin ja on siis kehitetty turvallinen, normaalissa ilmakehän paineessa toimiva, epäherkällä ja lyijyttömällä aloitusyhtymämassalla toimiva lasersytytin, sekä syttymis- ja välittymismalli.

## LÄHTEET

- [1]: de Yong, L., Nguyen, T. and Waschl, J. (1995). *Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A Review*. Melbourne: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
- [2]: Harkoma, M. (2010). Confinement in the diode laser ignition of energetic materials. [ebook] Tampere. Available at: [https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/confinement-in-the-diode-laser-ignition-of-energetic-materials\(0a83f687-b587-4e90-96f2-1b2486c1dd16\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/confinement-in-the-diode-laser-ignition-of-energetic-materials(0a83f687-b587-4e90-96f2-1b2486c1dd16).html) [Accessed 11 Jun. 2018].
- [3]: Korhonen, P. (2005). *Räjähdekirja*. [Helsinki]: Suomen kemian seura, pp.13-17.
- [4]: Korhonen, P. (2005). *Räjähdekirja*. [Helsinki]: Suomen kemian seura, pp.69-82.
- [5]: Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas. (2001). [Helsinki]: [Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus], p.264.
- [6]: En.wikipedia.org. (2018). *Fuse (explosives)*. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse\\_\(explosives\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_(explosives)) [Accessed 23 Jul. 2018].
- [7]: Forcit.fi. (2018). *AUSTIN ROCKSTAR II JA III SÄHKÖRÄJÄYTYSNALLIT*. [online] Available at: <http://forcit.fi/assets/product-brochures/AUSTIN-ROCKSTAR-INFO-FI.pdf> [Accessed 10 Jul. 2018].
- [8]: Korkee, A. (2011). YLI 8 MM PAKSUJEN TERÄSTEN LASERHITSAAMINEN CO 2 -, KUITU- JA KIEKKOLASERILLA. [online] Doria.fi. Available at: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72120/nbnfi-fe201110105697.pdf?sequence=3> [Accessed 26 Jun. 2018].
- [9]: Web.archive.org. (2007). Wayback Machine. [online] Available at: <http://web.archive.org/web/20070328152818/http://physics oulu.fi/fysiikka/oj/761104P/2006/38.pdf> [Accessed 11 Jun. 2018].
- [10]: Skocypec, R., Mahoney, A., Glass, M., Jungst, R., Evans, N. and Erickson, K. (1990). Modeling laser ignition of explosives and pyrotechnics: Effects and characterization of radiative transfer.
- [11]: Copybook.com. (2018). *Biomass Pyrolysis and Gasification – Processes and Differences*. [online] Available at: <https://www.copybook.com/companies/conversion-and->

resource-evaluation-ltd/articles/biomass-pyrolysis-and-gasification-processes-and-differences [Accessed 7 Aug. 2018].

[12]: En.wikipedia.org. (2018). Deflagration. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deflagration#cite\\_ref-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Deflagration#cite_ref-1) [Accessed 9 Jul. 2018].

[13]: Korhonen, P. (2005). *Räjähdekirja*. [Helsinki]: Suomen kemian seura, pp.24-30.

[14]: Yleinen ase- ja asejärjestelmäopas. (2001). [Helsinki]: [Puolustusvoimien koulutuksen kehittämiskeskus], p.80.

[15]: En.wikipedia.org. (2018). Activated complex. [online] Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Activated\\_complex](https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_complex) [Accessed 9 Jul. 2018].

[16]: Chemistry, I. (2018). IUPAC Gold Book - transition state. [online] Goldbook.iupac.org. Available at: <http://goldbook.iupac.org/html/T/T06468.html> [Accessed 9 Jul. 2018].

[17]: Cooper, P. (1996). *Explosives Engineering*. Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated, pp.93-98.

[18]: Christo, F. (1999). Thermochemistry and Kinetics Models for Magnesium/Teflon/Viton Pyrotechnic Compositions. [ebook] Melbourne. Available at: <https://catalogue.nla.gov.au/Record/1915810> [Accessed 11 Jun. 2018].

[19]: Sulimov, A., Ermolaev, B. and Sukoyan, M. (2012). Blast waves in a cylindrical channel generated by the nonideal detonation of aluminum-Teflon-RDX high-density formulations. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 6(3), pp.397-403.

[20]: Dolgoborodov, A., Makhov, M., Kolbanov, I., Streletskii, A. and Fortov, V. (2005). Detonation in an aluminum-Teflon mixture. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 81(7), pp.311-314.

[21]: FLUON (2018). Fluon® - Lubricant Powders - a guide to Applications, Properties & Processing Technical Service Note FTI500. [ebook] Available at: <http://www.agcce.com/brochurespdfs/technical/FTI500.pdf> [Accessed 11 Jun. 2018].

[22]: Koch, E. (2002). Metal-Fluorocarbon-Pyrolants: III. Development and Application of Magnesium/Teflon/Viton (MTV). [online] Available at: [https://doi.org/10.1002/1521-4087\(200211\)27:5<262::AID-PREP262>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1521-4087(200211)27:5<262::AID-PREP262>3.0.CO;2-8) [Accessed 5 Jun. 2018].

[23]: Denisaev, A., Shteinberg, A. and Berlin, A. (2007). Initiation of a reaction in aluminum-Teflon multilayer thin-film samples by drop-hammer impact loading. [online]

Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S199079310803024X> [Accessed 5 Jun. 2018].

[24]: Encyclopedia Britannica. (2018). *RDX | explosive*. [online] Available at: <https://www.britannica.com/technology/RDX> [Accessed 24 Jul. 2018].

[25]: En.wikipedia.org. (2018). *RDX*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/RDX> [Accessed 24 Jul. 2018].

[26]: Korhonen, P. (2005). *Räjähdekirja*. [Helsinki]: Suomen kemian seura, p.146.

[27]: Kinnunen, J. (2018). Pyrolyysihiilen teollinen hyötykäyttö. [online] Theseus.fi. Available at: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73375/Kinnunen\\_Jani.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73375/Kinnunen_Jani.pdf?sequence=1) [Accessed 25 Jul. 2018].

[28]: Hintsanen, P. (2018). *Coloria.net | © Päivi Hintsanen 2000-*. [online] Coloria.net. Available at: <http://www.coloria.net/varit/hiilimusta.htm> [Accessed 25 Jul. 2018].

[29]: Filamentti.com. (2018). Tekniset tiedot PLA - 3D materiaalit ja Arduino - filamentti. [online] Available at: <http://www.filamentti.com/tekniset-tiedotPLA/> [Accessed 31 Jul. 2018].

[30]: Rogers, T. (2018). *Everything You Need to Know About ABS Plastic*. [online] Creativemechanisms.com. Available at: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic> [Accessed 10 Oct. 2018].

[31]: Valtanen, E. (2012). *Tekniikan taulukkokirja*. 19th ed. Jyväskylä: Genesis-kirjat, pp.468-475.

[32]: En.wikipedia.org. (2018). *Bending*. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bending> [Accessed 1 Oct. 2018].

[33]: Puro, M. (2015). *LUJUUSOPIN SOVELTAMINEN TUOTEKEHITYKSESSÄ*. Opinnäytetyö. KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU.

[34]: Janaf.nist.gov. (2018). Carbon. [online] Available at: <https://janaf.nist.gov/tables/C-002.html> [Accessed 5 Jul. 2018].

[35]: Webbook.nist.gov. (2018). Magnesium fluoride. [online] Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7783406&Type=JANAFS&Table=on#JANAFS> [Accessed 5 Jul. 2018].

[36]: Janaf.nist.gov. (2018). Magnesium. [online] Available at: <https://janaf.nist.gov/tables/Mg-002.html> [Accessed 5 Jul. 2018].

- [37]: Janaf.nist.gov. (2018). Teflon. [online] Available at: <https://janaf.nist.gov/tables/C-122.html> [Accessed 5 Jul. 2018].
- [38]: Thorlabs.com. (2018). SMA905 Multimode Connector. [online] Available at: <https://www.thorlabs.com/drawings/4eea3e9a74dd1135-25F69860-C412-18FE-B2DE233AAFD8E440/10245A-AutoCADPDF.pdf> [Accessed 30 Jul. 2018].
- [39]: Manichelli, J. and Yang, L. (1970). *Sensitivity of Explosives to Laser Energy*. Pasadena: California Institute of Technology.
- [40]: Turpeinen, T. (2018). *Tulitikkumassa lasersytytysmateriaalina*. Loppuraportti AO17268. Puolustusvoimien tutkimuslaitos. Ylöjärvi.
- [41]: Grys, S. and TRZCIŃSKI, W. (2010). *Calculation of Combustion, Explosion and Detonation Characteristics of Energetic Materials*. Central European Journal of Energetic Materials. Available at: <http://www.wydawnictwa.ipo.waw.pl/cejem/2-2010/full/Grys.pdf>
- [42]: DE Yong, L. and Smit, K. (1991). *A Theoretical Study of the Combustion of Magnesium/Teflon/Viton Pyrotechnic Compositions*. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center, p.11.
- [43]: Dixon, W. and Massey, F. (1957). *Introduction to Statistical Analysis*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company Inc.





## Tilastollinen analyysi

Liitteen 1 Taulukossa 1 numero 1 tarkoittaa syttynyttä ja numero 0 taas syttymätöntä näytettä. Näytemäärä N valitaan pienimmän esiintymismäärän perusteella. [43]

$N: \sum n_i [0] = 16$  on suurempi kuin  $N: \sum n_i [1] = 15$ , joten N:ksi valitaan 15

Arvo i kuvaa kunkin syttymisvirran esiintymislukumäärän, jonka avulla saadaan arvot A:lle ja B:lle seuraavasti: [43]

$$A: \quad \sum i * n_i[1] = 4 * 2 + 1 * 2 + 6 * 1 = 16$$

$$B: \quad \sum i^2 * n_i[1] = 4 * 22 + 1 * 22 + 6 * 12 = 26$$

Näiden avulla lasketaan keski-arvo seuraavasti: [43]

$$\bar{X} = y + d\left(\frac{A}{N} \pm 0.5\right) = 1.13 + 0.02\left(\frac{16}{16} - 0.5\right) = 1.14$$

Tässä y on vasemmalta luettuna ensimmäistä numero 1:n saraketta vastaava logaritminen sähkövirran arvo, mikäli N:ksi olisi valittu numero 0, olisi valittu sitä vastaava sähkövirran logaritminen sarakke vasemmalta luettuna. Kaavassa d taasen on normaalijakauman oletusarvo/oletusvirhe, kun taas  $\pm 0.5$ :stä valitaan joko positiivinen tai negatiivinen merkki sen mukaan kumpi valitaan N:ksi 1 tai 0 (+0.5 nolalle ja -0.5 ykköselle). Nyt saatu tulos kuvastaa syttymisvirran logaritmista arvoa joka vastaa virran arvoa 13.8 ampeeria. Seuraavaksi selvitetään keskihajonta s. [43]

$$s = 1.620d\left(\frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029\right) = 1.620 * 0.02\left(\frac{16 * 26 - 162}{162}\right) + 0.029 = 0.021$$

Kaava keskihajonnalle on vain arvio, joka kuitenkin on melko tarkka kun  $(NB - A^2)/N^2$  on suurempi kuin 0.3, mutta tarkkuus heikkenee nopeasti mikäli luku on alle 0.3, tässä esimerkissä arvo on 0.625. 5% syttymistodennäköisyyttä kuvaava kaava on seuraavanlainen: [43]

$$P_{05} = \bar{X} - z_{\alpha}s = 1.14 - 1.645 * 0.021 = 1.1055$$

Missä  $z_{\alpha} = 1.645$  on valittu normaalijakauman taulukosta. Arvo  $P_{05} = 1.1055$  vastaa 12.75 ampeerin syttymisvirtaa. Vastaavasti 95% syttymistodennäköisyydelle kaava: [43]

$$P_{95} = \bar{X} + z_{\alpha}s = 1.14 + 1.645 * 0.021 = 1.1175$$

Arvo  $P_{95} = 1.1175$  vastaa 14.968 ampeerin, eli noin 15 A:n, syttymisvirtaa.

## LIITE 2: SYTTYMISVIRRRAN SUHDE LASERIN TEHOON

*Taulukko 1 Liitteessä 2. Syttymisvirran suhde laserin tehoon.*

Laserin energia mittaust					
	Laserpulssin Energia	Laserpulssin Teho	Laitteen Huippusähköteho	Laserpulssin Energiatiheys	Laitteen Pulssienergia
[A]	[mJ]	[W] = [J/s]	W	[J/cm <sup>2</sup> ]	J
14.986	1.84	0.0184	29.972	0.366	2.9972
9	6.12	0.0612	18	1.218	1.8
10	10.5	0.105	20	2.089	2
11	15	0.15	22	2.984	2.2
12	19.5	0.195	24	3.879	2.4
13	23.5	0.235	26	4.675	2.6
14	28	0.28	28	5.570	2.8
15	32.2	0.322	30	6.406	3
16	36.5	0.365	32	7.261	3.2
17	40.7	0.407	34	8.097	3.4
18	45.1	0.451	36	8.972	3.6
19	49.3	0.493	38	9.808	3.8
20	53.6	0.536	40	10.663	4
21	57.9	0.579	42	11.519	4.2
22	62.1	0.621	44	12.354	4.4
23	66.4	0.664	46	13.210	4.6
24	70.5	0.705	48	14.026	4.8
25	75	0.75	50	14.921	5
26	79	0.79	52	15.717	5.2
27	83	0.83	54	16.512	5.4
28	87	0.87	56	17.308	5.6
29	92	0.92	58	18.303	5.8
30	96	0.96	60	19.099	6
31	100	1	62	19.894	6.2
32	104	1.04	64	20.690	6.4
33	108	1.08	66	21.486	6.6
34	112	1.12	68	22.282	6.8
35	116	1.16	70	23.077	7
36	120	1.2	72	23.873	7.2
37	124	1.24	74	24.669	7.4
38	128	1.28	76	25.465	7.6
39	132	1.32	78	26.261	7.8
40	138	1.38	80	27.454	8

Laserpulssin energia mitattiin kullekin sähkövirralle yhden ampeerin välein, josta saatiin laserin teho laskettua jakamalla pulssin energiamäärä pulssin pituudella, eli 0.1 sekunnilla ja muuttamalla millijoulet jouleiksi:

$$\frac{mJ}{0.1s * 1000} = W$$

Huippusähköteho taas saatiin kertomalla virta jännitteellä. Jännite oli vakio 2 voltia:

$$P = U * I$$

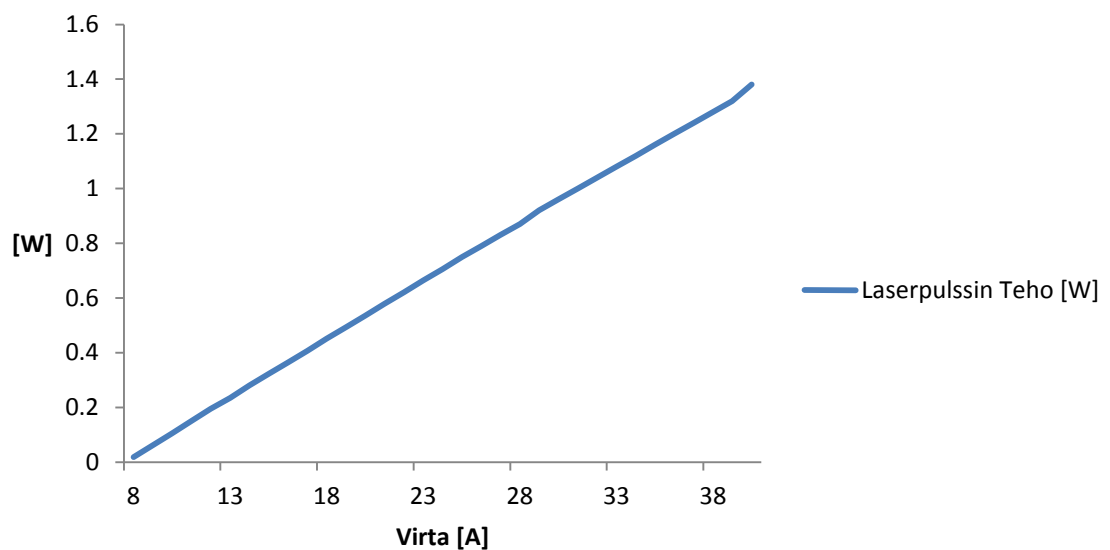
Laserpulssin energiatiheys saatiin jakamalla pulssin energiamäärä pulssin pinta-alalla ( $0.0053 \text{ cm}^2$ ) ja muuttamalla millijoulet jouleiksi:

$$\text{J/cm}^2 = \frac{m\text{J}}{0.0053 * 1000}$$

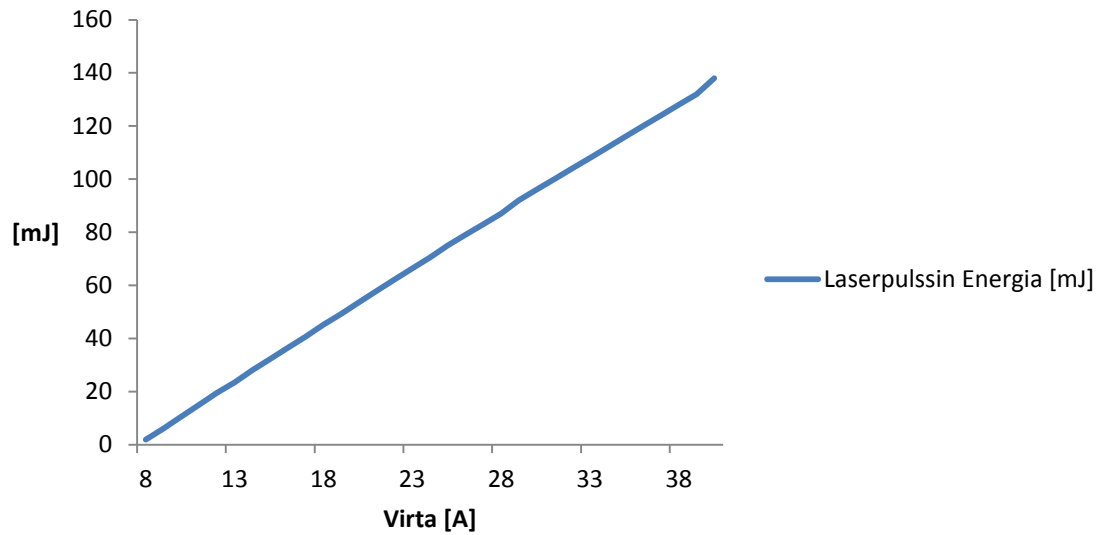
Laitteen pulssienergia tarkoittaa laitteen lähettämää pulssienergian määrää, joka saadaan kertomalla virta jännitteellä ja pulssin pituudella:

$$J = U * I * 0.1s$$

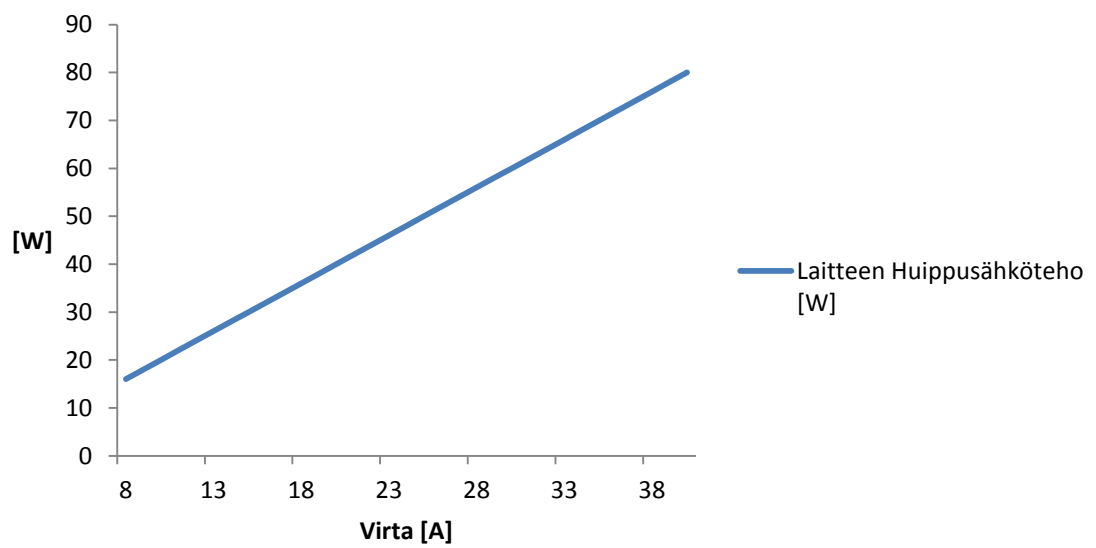
Liitteen 2 Taulukosta 1 tehtiin kuvaajat (Kuvat 1,2,3,4,5 Liitteessä 2), joissa on havainnollistettu taulukon arvot sähkövirran funktiona.



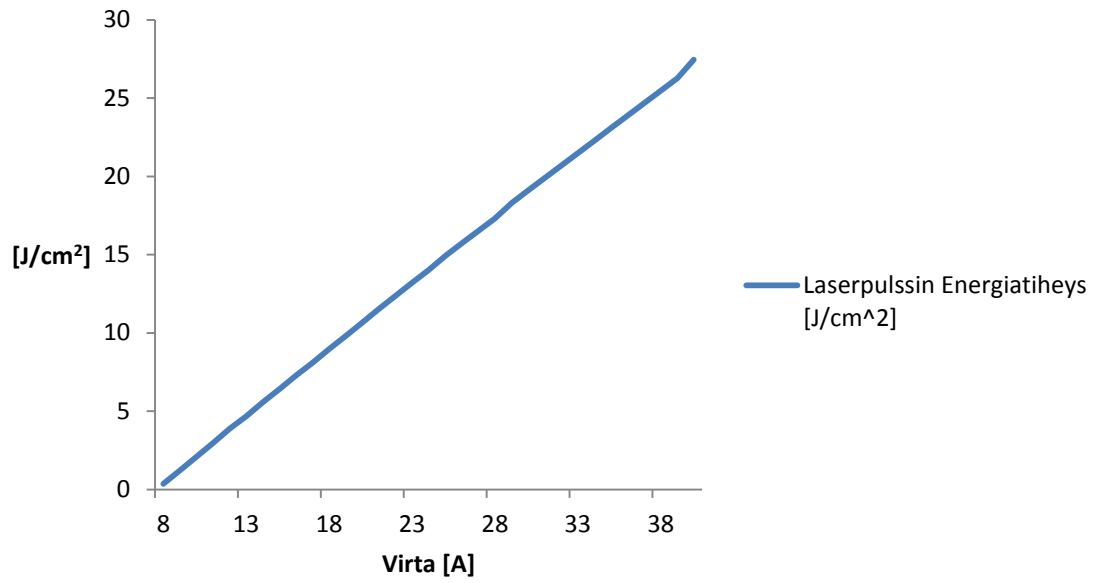
***Kuva 1 Liitteessä 2. Laserpulssin teho sähkövirran funktiona.***



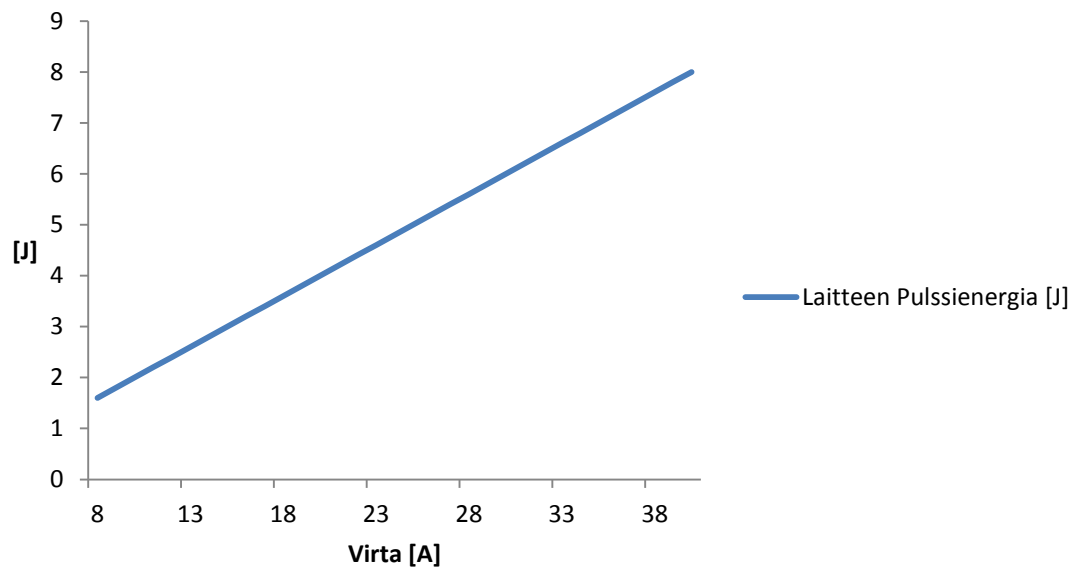
***Kuva 2 Liitteessä 2. Laserpulssin energia sähkövirran funktiona.***



***Kuva 3 Liitteessä 2. Laitteen huippusähköteho sähkövirran funktiona.***



**Kuva 4 Liitteessä 2. Laserpulssin energiatiheys sähkövirran funktiona.**



**Kuva 5 Liitteessä 2. Laitteen pulssienergia sähkövirran funktiona.**